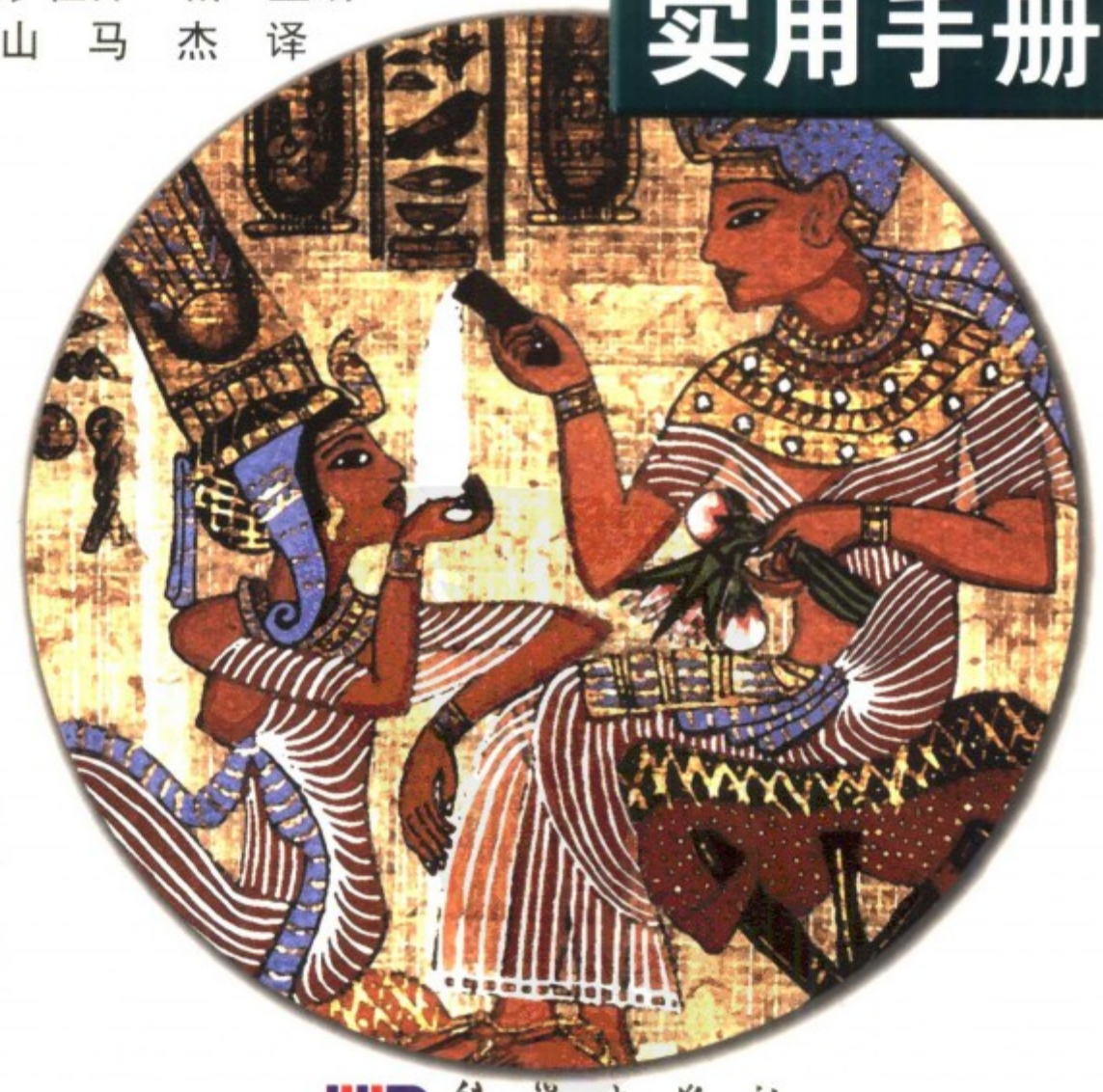
Technology 实用技术

OHM handbook 第二版

电工

实用手册

〔日〕桂井 诚 主编
吕砚山 马 杰 译



科学出版社
www.sciencep.com

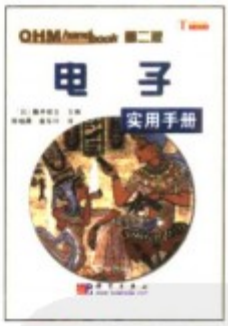
(TM-0390.0101)
责任编辑　杨　凯　崔炳哲
责任制作　魏　谨
封面设计　李　力

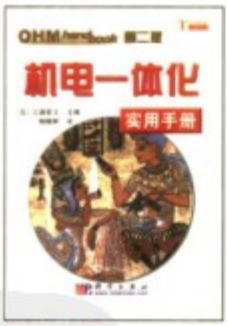
Technology
实用技术

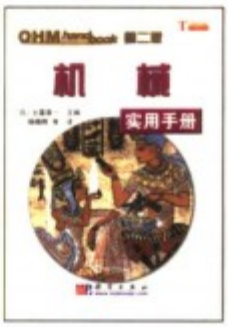
丛书特点

★ 方便选择学习	各章内容相对独立，可根据需要选择学习
★ 提高学习效率	板块式的编写方式，有利于提高学习效率
★ 满足不同要求	系统性强，从基础知识到应用技术
★ 版 式 新 颖	重点名词标注在正文左侧，便于查找。书末给出索引
★ 便 于 学 习	丰富、易懂的图表，快速掌握相关内容









ISBN 978-7-03-018261-6
9 787030 182616 >

建议上架类别：工业技术／电工技术

科学出版社 东方科龙
http://www.okbook.com.cn
cuibingzhe@mail.sciencep.com

定　价：42.00 元

OHM handbook 第二版

电工

实用手册

〔日〕桂井 诚 主编
吕砚山 马 杰 译



科学出版社
北京

图字：01-2006-2187 号

内 容 简 介

本书为“OHM handbook”系列之一。该系列共 4 册，分别对电工、电子、机械及机电一体化等专业领域的基础理论知识、典型应用以及最新发展动态进行介绍。本系列特点是内容丰富但精炼，重点突出，插图丰富，有重点名词提示，并在书末附有中文索引。

本书共 10 章 150 节，重点介绍直流电路、静电与磁、交流电路、电子电路的基本原理、电工电子测量、自动控制、电机与电力电子学、电力系统、设备与施工及电器技术应用。每章通过要点、解释及相关应用，对重要问题加以总结，根据内容特点设置例题、必备知识、选修知识等栏目，既增加了趣味性，又便于读者理解和掌握。

本书既适于立志从事电工电子相关专业的学生、电工爱好者阅读，亦可作为活跃在生产、科研一线的技术人员的实用工具书。

图书在版编目(CIP)数据

电工实用手册/(日)桂井诚主编；吕砚山；马杰译. —2 版. —北京：科学出版社，2007

(OHM handbook)

ISBN 978-7-03-018261-6

Ⅰ. 电… Ⅱ. ①桂…②吕…③马… Ⅲ. 电工-技术手册

Ⅳ. TM-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 148903 号

责任编辑：杨 凯 崔炳哲 / 责任制作：魏 谨

责任印制：刘士平 / 封面设计：李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

http://www.okbook.com.cn

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

http://www.sciencep.com

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 7 月第 一 版 开本：A5(890×1240)

2007 年 1 月第 二 版 印张：19 1/4

2007 年 1 月第六次印刷 字数：493 000

印数：17 001—22 000

定 价：42.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈环伟〉)

译者的话

本书是《电工实用手册》第二版。

新版根据科学技术的新进展，适应现代社会发展的需要，大量收入了最新技术及其实际应用的相关知识，内容更加丰富，应用更能结合实际。

它是一本全面介绍电工学有关知识的基础读物。在编排上按学科分门别类，具有特色，也可以作为经常备查的工具书使用。其特点是内容精炼，重点突出，通俗易懂。全书共分10章，包括电工基础理论、电子技术、自控原理、电测电机与控制、电气施工以及其他电气技术应用。几乎涉及所有电工技术领域，使读者一书在手，学习查用方便。

在阐述方法上，每章开始都有概要，每节之下又通过**要点**、**解释**及**相关知识**等对若干重要问题加以扼要总结。之后又根据各节内容的特点安排了**例题**、**必备知识**、**选修知识**、**应用知识**等栏目，对已阐述过的内容加以总结和提高，既增加了趣味性，又便于读者理解和掌握。这些栏目使理论与实际紧密联系起来。

本书仍由吕砚山(1～6章)、马杰(7～10章及索引)翻译并相互进行了审校，对原书中的一些错误做了订正，以便读者参考。虽经译者尽心译、校，但限于水平，书中难免仍有谬误之处，敬请读者批评指正。

主编的话

电能的利用，促进了作为社会进步支柱的经济的发展和人们生活水平的提高，为现代社会提供了种种方便。从家庭和学校、办公室的照明及温度调节，到具备最新自动化系统的工厂以及安全的快速舒适的交通系统，直至生活中的方方面面，无不体现出电能的作用。随着电子、信息、通信等领域的发展，作为其公共基础的电工知识更显重要，成为使社会面貌发生巨大改变的多媒体信息化时代不可或缺的知识。

21世纪所面临的环境保护、能源和资源的有效利用问题，是我们应该认真对待的重大问题。可以预见，包括解决这些问题，电能的利用和电子技术及计算机技术的普及，今后还会有更进一步发展，从而激起我们对与日常生活中休戚相关的各种技术和安全的保障寄以更大的期望。

本书以怀有上述各种期望，对亲手实现电气世界绚丽远景充满憧憬，立志于将来从事电工电子相关技术工作的青年读者为对象，通俗易懂地介绍电工技术的基本知识及其应用。使读者能乐于自学，掌握电工学的全貌，充分理解必要的知识，并为其灵活运用而努力。

同时，在对电工学的广阔领域进行系统地解说，分门别类地整理成便于应用知识的基础上，也大量收入了最新技术及其实际应用的相关内容。因此即使对于目前活跃在生产、科研第一线的技术人员，本书也不失为一本放在手边供经常备查的实用工具书。

本书多承具有丰富经验的编委、执笔者各位的共同努力才得以完成，我衷心地希望它能成为读者们学习电工技术的不可多得的一本工具书。

桂井　诚

编纂委员会

主　　编

桂井　诚(东京大学名誉教授,工学博士)

编纂委员

大石清彦(日本工学院专科学校)
冈本裕生(东京都立葛西工业高等学校)
柿下和彦(职业能力开发综合大学)
工藤雄司(筑波大学附属坂户高等学校)
坂本宪昭(法政大学)

执　　笔

东　英道(东京都立北丰岛工业高等学校)
石井昌幸(前新潟县立新潟工业高等学校)
扇柳政则(前东京都立乌山工业高等学校)
大石清彦(日本工学院专科学校)
冈本裕生(东京都立葛西工业高等学校)
小幡松二(长冈技术科学大学)
小野寺理文(职业能力开发综合大学)
柿下和彦(职业能力开发综合大学)
工藤雄司(筑波大学附属坂户高等学校)
仓地　修(前新潟县立新潟县央工业高等学校)
黑柳秋男(职业能力开发综合大学)
纷川昌巳(东京都立藏前工业高等学校)
昆　秀行(东京都立墨田工业高等学校)
坂じゅんいち(前大阪府立藤井寺工业高等学校)
坂藤由雄(埼玉县立春日部工业高等学校)
坂部　隆(新潟县立川西高等学校)
坂本宪昭(法政大学)
佐野正史(前新潟县立中条工业高等学校)
志贺道男(新潟县立上越综合技术高等学校)
关　敏昭(千叶县立京叶工业高等学校)
仲道嘉夫(东京工业大学附属科学技术高等学校)
长谷川准(山梨县立谷村工业高等学校)
原口勇人(文德高等学校)
日野安喜(职业能力开发综合大学)
半田伸明(日本工学院专科学校)
前田平作(东京都立八王子工业高等学校)
村田克彦(文德高等学校)
渡边和之(日本工学院专科学校)
渡边　勉(埼玉县立综合教育中心)

编纂助理

饭高成男(前东京都综合技术教育中心)
家村道雄(崇城大学)
关　孝明(前神奈川县立商工高等学校)
田边　充(前神奈川县立相模台工业高等学校)

有关本书的说明

本书的构成

（1）全书由10章150节构成，各节内容相对独立，均可单独作为手册使用。因此，不管从哪一节开始阅读都能很好地理解。

（2）各节按【要点】、【解释】的顺序通俗易懂地进行了讲解，必要之处还设置了【相关知识】栏目。

【要　　点】	在每一节的前头，对该节题目的结论进行概要性的叙述。
【解　　释】	设置了一系列醒目的小标题（带有□记号的标题），对【要点】的内容进行详细的说明。
【相关知识】	对与本节题目相关的事项和关键词作扼要的说明。

（3）为了能在短时间内了解每一节的内容，只要读懂【要点】，就可以迅速理解该节的知识。

图、表的使用方法

（1）全书大约有760幅照片、图、表。并且还在照片、图中加入了适当的说明，以便读者对内容的理解。

（2）若技术人员熟练地掌握了书中引用的图例，则在阅读其他资料时就会发现它能有助于对其他知识的理解。

关键词的查询

（1）文中的重要名词、用语，用黑体字做了明确表示。

（2）由于在卷末列有索引，故本书可作为名词用语字典来灵活使用。

选择性标题与本书所附资料

（1）与各节题目相适应，有选择性地设置了下列项目：

【例　　题】为了能够真正理解该题目的内容，给出相应易懂的例题。

【必备知识】介绍重要公式、术语及基本的思考方法等。

【选修知识】介绍便于默记并灵活应用的内容。

【篇 外 话】介绍与题目相关的有趣话题或尖端技术。

（2）在本书正文的开头和末尾，汇总了学习电工技术所必须掌握的重要单位与量的符号，以便读者在阅读其他书籍或资料以及作调研报告时参考。

目　录

第1章 直流电路

1 电子与电流 …… 2
2 电压与电动势 …… 5
3 欧姆定律 …… 8
4 电阻的合成 …… 10
5 导电材料与电阻率(电导率、电阻的温度变化) … 15
6 基尔霍夫定律 …… 18
7 叠加原理 …… 22
8 戴维南定理 …… 24
9 电功率与电能 …… 26
10 电流的热效应 …… 28
11 电　池 …… 32

第2章 静电与磁

1 库仑定律 …… 38
2 电场与高斯定理 …… 41
3 电位与电位差 …… 46
4 电　容 …… 50
5 电容器的连接与合成电容 …… 54
6 电容器中储存的电能 …… 57
7 磁　荷 …… 59

CONTENTS

8 磁 场 …… 60
9 安培定律 …… 63
10 毕奥-萨伐尔定律 …… 65
11 电磁力 …… 69
12 电磁感应 …… 73
13 电 感 …… 76

第3章 交流电路

1 什么是交流 …… 80
2 正弦交流的频率与相位 …… 84
3 正弦交流的表示方法 …… 86
4 交流的相量表示 …… 89
5 相量的复数表示 …… 92
6 纯*R*、*L*、*C* 交流电路 …… 95
7 单相交流电路 …… 100
8 谐振电路 …… 104
9 交流电桥 …… 107
10 单相交流电路的功率 …… 109
11 三相交流的产生与表示方法 …… 113
12 三相连接的种类 …… 117
13 三相交流电路的计算 …… 121
14 电源与负载连接方法不同的三相电路 …… 127
15 三相交流电路的功率 …… 132
16 不对称三相电路 …… 135
17 非正弦交流 …… 139
18 *RL* 串联电路的过渡过程 …… 143
19 *RC* 串联电路的过渡过程 …… 147

第4章 电子电路的基本原理

1 什么是半导体 …… 154
2 掺杂半导体 …… 157
3 二极管 …… 161
4 双极晶体管 …… 166
5 晶体管的放大作用 …… 171
6 偏置电路 …… 175
7 场效应管 …… 178
8 各种电子器件 …… 185
9 运算放大器 …… 190
10 串联谐振电路 …… 199
11 并联谐振电路 …… 202
12 调幅电路 …… 205
13 调频电路 …… 208
14 直流稳压电源电路 …… 211
15 开关电源电路 …… 214
16 数的表示 …… 216
17 逻辑代数(布尔代数) …… 220
18 逻辑电路的基本原理 …… 221
19 数字集成电路 …… 227
20 A/D、D/A 变换器 …… 233

第5章 电工电子测量

1 测量方法与测量值 …… 240
2 直流电压、电流的测量 …… 242
3 交流电压、电流的测量 …… 247

4 指示式仪表的分类与使用方法 …… 251
5 数字式仪表 …… 254
6 电阻的测量 …… 256
7 电位差计 …… 260
8 高电压、大电流的测量 …… 262
9 阻抗的测量 …… 265
10 功率、电能的测量 …… 267
11 磁的测量 …… 270
12 由低频到高频的频率测量 …… 272
13 波形的测量 …… 274
14 具有微机的电子测量系统 …… 278

第6章 自动控制

1 自动控制的分类 …… 282
2 反馈控制 …… 284
3 传递函数与方框图 …… 288
4 控制系统的特性 …… 292
5 伺服机构与过程控制 …… 296
6 顺序控制 …… 300
7 继电器顺序控制 …… 302
8 继电器顺序控制的基本电路 …… 305
9 继电器顺序控制电路的读图 …… 309
10 可编程控制器 …… 312
11 可编程控制器的国际标准 …… 317
12 计算机控制 …… 319

第7章 电机与电力电子学

1 什么是直流电机 …… 326
2 直流发电机的种类及特性 …… 329
3 直流电动机的种类及特性 …… 334
4 直流电动机的运行 …… 338
5 什么是变压器 …… 341
6 变压器的特性 …… 344
7 变压器的运行 …… 347
8 变压器的接线 …… 349
9 特殊变压器的种类和用途 …… 352
10 什么是三相感应电动机 …… 357
11 三相感应电动机的性质 …… 359
12 三相感应电动机的特性 …… 362
13 三相感应电动机的运行 …… 364
14 什么是单相感应电动机 …… 367
15 其他感应电机 …… 369
16 什么是同步电机 …… 372
17 同步发电机的特性 …… 374
18 同步发电机的运行 …… 377
19 同步电动机的特性 …… 380
20 同步电动机的运行 …… 385
21 其他电动机的种类及用途 …… 389
22 电工材料 …… 394
23 电力半导体器件 …… 398
24 使用半导体的电力变换 …… 402

第8章 电力系统

1 能量资源与电力供应 …… 408
2 水力发电 …… 412
3 火力发电 …… 421
4 原子能发电 …… 427
5 特殊发电 …… 433
6 能源的有效利用与环境对策 …… 440
7 电力系统 …… 446
8 直流输电与交流输电 …… 448
9 输电线路的线路参数 …… 451
10 输电线路的构成及特性 …… 456
11 配电线路的电压及配电方式 …… 460
12 配电线路的构成 …… 464
13 配电线路的特性 …… 468
14 配电线路的电压调整 …… 472
15 电力系统的维护 …… 475

第9章 设备与施工

1 术语的定义及用法 …… 482
2 有关电气法规 …… 485
3 室内基本配线 …… 494
4 施工场所与配线方法 …… 502
5 业务用(企业自用)高压配电变电设备 …… 510
6 业务用电气工作物的绝缘耐力试验 …… 517
7 室内配线的试验与检查 …… 520

第10章 电气技术应用

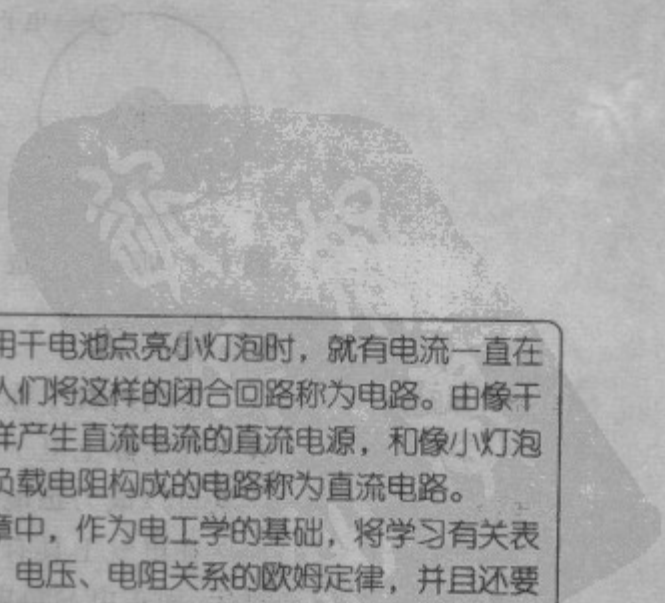
1 光　源 …… 524
2 光的基础知识 …… 528
3 点光源产生的照度 …… 533
4 照明设计 …… 537
5 电加热 …… 542
6 电热的计算 …… 545
7 电炉与电焊 …… 549
8 电　解 …… 554
9 电　池 …… 556
10 电车线路与车辆 …… 561
11 电车的控制与安全运行 …… 563
12 各种各样的交通系统 …… 567
13 机械电子学基础 …… 573
14 机器人与工厂自动化 …… 577
15 其他电气技术应用 …… 578

跋 …… 585
索引 …… 587

第 1 章

直流电路

● 责任编委
工藤雄司
● 执　　笔
中道嘉夫(1～5)
长谷川　准(6～9, 11)
工藤雄司(10)



当用干电池点亮小灯泡时，就有电流一直在流通。人们将这样的闭合回路称为电路。由像干电池这样产生直流电流的直流电源，和像小灯泡这样的负载电阻构成的电路称为直流电路。

本章中，作为电工学的基础，将学习有关表示电流、电压、电阻关系的欧姆定律，并且还要学习：计算多个电阻构成的合成电阻的方法；适用于由多个直流电源等器件构成的复杂直流电路的基尔霍夫定律、叠加原理、戴维南定理；功率与电流的关系；体现电流热效应的焦耳热；以及电池等有关直流电路的各种知识。

1　电子与电流

要　点

在电路中流动的电流就是单位时间内通过某一截面的电荷量。电荷是由带正电的质子和带负电的电子构成的。在电路中所流动的是质量小的带负电的电子。

解　释

电　子

世界上几乎所有的物质都由分子构成，而分子则由原子构成。原子如图1.1所示，由原子核与围绕其周围旋转的电子组成。另外，原子核是由质子和中子构成的，它们具有比电子大得多的质量。

在铜或铝等导电金属内部，围绕原子核周围旋转的电子中最外层的电子，能够脱离本身原子核的吸引而产生在原子核之间移动的现象。这种脱离了其本身的原子核而能自由移动的电子，称为**自由电子**，如图1.2所示。

自由电子

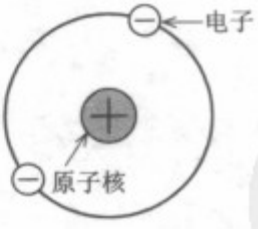


图1.1　原子的构造

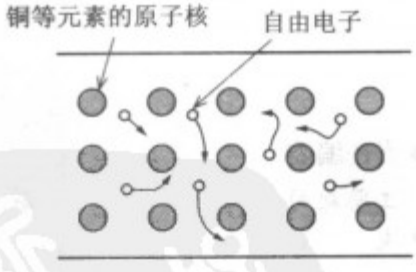


图1.2　自由电子的形态

电　流

电荷　库[仑]

带电的粒子称为**电荷**，电荷的量以**库[仑]**(符号为C)表示。实际上电子的聚积形成负的电荷，而原子中去掉电子就可以成为**正电荷**。

正电荷

在电气上具有正电与正电之间或是负电与负电之间相排斥，而正电与负电之间相吸引的性质。因此，当自由电子上受到力的作用时，电子会朝一定方向运动。这时，将单位时间内通过某一截面的电荷数量(电量)称为**电流**，可用式(1.1)表示，即

电流

$$I=\frac{Q}{t} \tag{1.1}$$

电量

当强调一定的间隔而计算单位时间内移动的**电量**时，则可写为

$$I=\frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

若表示间隔的 Δ 趋近于 0，将其称为微分，则可写为

$$I=\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}$$

安[培]

当单位时间为 1 秒(s)，电荷的量为库[仑]时，电流的单位为**安[培]**(A)。此外，由于电子带有负的电荷，故电流的方向与电子移动的方向相反。

例 题

1 在 5s 内有 0.1C 的电量移动，其电流是多少安培？

答 由式(1.1)，电流 I 为：

$$I=\frac{Q}{t}=\frac{0.1}{5}=0.02(\mathrm{A})=20\times10^{-3}(\mathrm{A})=20\ (\mathrm{mA})$$

2 当有 1μA 的电流流动时，经 2s 会有多少电量移动？移动的电子数目是多少？已知一个电子的带电量为 1.6×10^{-19}C。

答 把式(1.1)变换成 $Q=?$ 的形式就有

$$Q=It=1\times10^{-6}\times2=2\times10^{-6}(\mathrm{C})=2\ (\mu\mathrm{C})$$

电子的个数可从求得的电量被 1 个电子的带电量除而得到

$$\frac{2\times10^{-6}}{1.6\times10^{-19}}=1.25\times10^{13}\text{个}$$

必备知识

电 流

单位时间内电荷的移动量。→$I=\frac{Q}{t}$

电流流动的方向与电子的移动方向相反。

电 荷

能够产生电气现象的物体。此电荷的数量称为电量。

→参看静电库仑定律。

电　子

围绕原子核的周围旋转的物体，带有负的电荷，其电量以 e 表示：

$$e=-1.602\times10^{-19}\ (\mathrm{C})$$

2　电压与电动势

要　点

电压好像是使电流流动的电气压力，而产生此压力的动力称为电动势。

解　释

电　压

电流是由电荷移动而形成的。电荷的移动则由电气的吸引力(在＋、－的场合)或是排斥力(在＋、＋或－、－的场合)而引起。这种从静电着眼所作的说明，由于是对每一个电荷的情形而言，汇集起来比较复杂。因此，就不从每一个电荷来考虑，而是从全部的电荷所受的力即作为压力来考虑，这就是**电压**。

电压

电压的单位为**伏[特]**(V)。以某点为基准，任意一点对该点的电压称为**电位**。再有，任意2点之间的电位之差，称为**电位差**，其单位皆采用伏[特]。另外，取作基准的某一点被称为接地点(简记为GND)，该点的电位为0V。

伏[特]
电位
电位差

对电压或是电流，若将其想象成水柱状流水的情况就较易理解了。

电动势

产生电压的势力称为**电动势**。产生电动势的物体有使用化学能的电池和使用动能的发电机。

电动势

电路示例

图1.3表示产生电动势的电池与流通电流的导线，以及当电流流过即发光的小灯泡相连接而成的简单电路。电流从电池的正端流出，经过导线使电灯发光，然后再流回电池的负端。这样，由于电流的流动形成回路，故称为**电路**。电路肯定具有不少于一个的回路。在具有多个回路时，通常使用基尔霍夫定律进行计算。

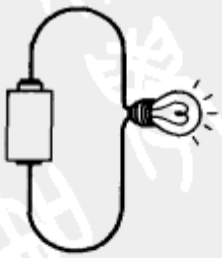


图1.3　电　路

电路

例　题

【1】 图 1.4 表示多个电池的连接，试求 a 点与 b 点的电位。此外，再求 ab 间的电位差 V_{ab}。

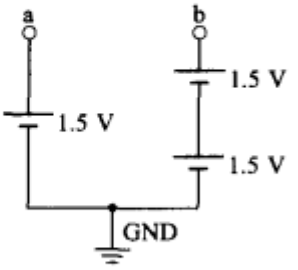


图 1.4　求电位

【答】 由于 a 点的电位比基准点 GND 高 1.5V，故

$$V_a = 1.5\text{V}$$

同理，

$$V_b = 1.5 + 1.5 = 3\ (\text{V})$$

ab 间的电位差为

$$V_{ab} = V_a - V_b = 1.5 - 3 = -1.5\ (\text{V})$$

必备知识

电　压

电压为使电流流动的电气压力，单位为 V。

电动势

产生电压的势力。产生电动势的物体有电池和发电机等。

电　路

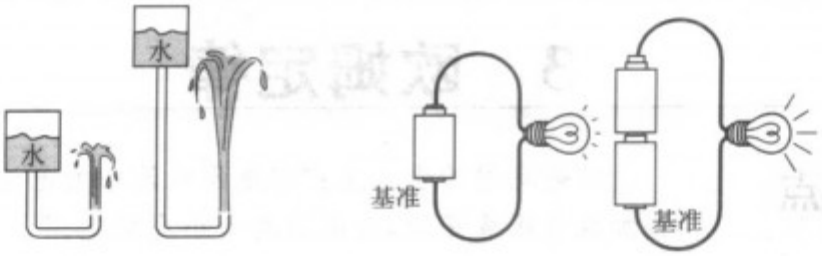
电流由电池等电源流出，到再流回来为止所经过的路程。

题外话

电与水的相似性

电是眼睛看不见的东西，因此，最好以水为例来作说明。在习惯于电气的思考方法之前，可用水来替换它加以理解。

如图 1.5 所示，以地面为基准将水放得越高，水压也越高，在同样的软管中势必流出更多的水。而电气的情况则是，以电池的负端为基准若连接的电池越多，电压也越高，在同样的小灯泡下因电压增高而电流增大，变得更亮了。



水压越高势头越好，有大量的水喷出

同样的小灯泡，在电压增高时流过的电流增大，变得更亮

图 1.5　水压与电压的相似性

3　欧姆定律

要　点

欧姆定律的含义是："在电阻中流动的电流，与在其两端施加的电压成正比，与电阻的大小成反比。"

解　释

电　阻

阻碍电流流动的器件称为电阻，其单位用欧[姆]（符号为 Ω）表示。1Ω 相当于在电阻上施加 1V 电压时流过 1A 电流时的电阻。

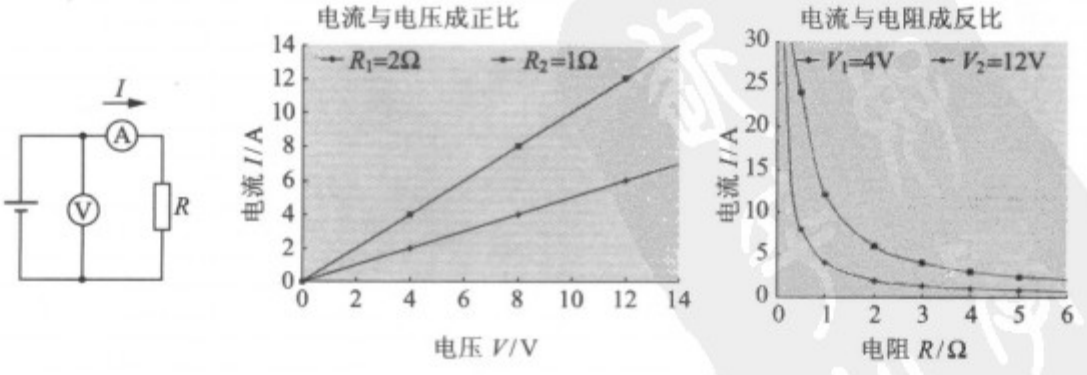
电流 I、电压 V、电阻 R 之间的关系（欧姆定律）

欧姆定律

图 1.6(a)表示**欧姆定律**的实验电路。图 1.6(b)表示当电阻的数值一定时的测量结果，即"电压与电流成正比"。图 1.6(c)表示当电压的数值一定时的测量结果，即"电流与电阻成反比"。欧姆定律就是根据这种实验结果而得出的，可用下式表示：

$$I=\frac{V}{R},\quad V=IR,\quad R=\frac{V}{I}$$

只要记住这些式子中的任一个，其他形式就可利用简单的变形得出，可以记住最易记的式子。



(a) 实验电路　　(b) 电压－电流曲线　　(c) 电阻－电流曲线

图 1.6　电流 I、电压 V、电阻 R 之间的关系

相关知识

◆ 电压、电流、电阻单位

电压、电流、电阻的单位可以附带 μ、m 等接头字，如表 1.1 所示。

表 1.1 常用的电压、电流、电阻的单位

	V(伏[特])	A(安[培])	Ω(欧[姆])
μ(微)	$1\mu V=1\times10^{-6}V$	$1\mu A=1\times10^{-6}A$	$1\mu\Omega=1\times10^{-6}\Omega$
m(毫)	$1mV=1\times10^{-3}V$	$1mA=1\times10^{-3}A$	$1m\Omega=1\times10^{-3}\Omega$
k(千)	$1kV=1\times10^{3}V$	$1kA=1\times10^{3}A$	$1k\Omega=1\times10^{3}\Omega$
M(兆)	$1MV=1\times10^{6}V$	$1MA=1\times10^{6}A$	$1M\Omega=1\times10^{6}\Omega$

◆ 电　导

将导电的程度称为电导，用电阻的倒数来表示。其单位为西[门子](符号为 S)，可用下面的式子表示：

$$G=\frac{1}{R}$$

例 题

1 当在 2Ω 的电阻上施加 10V 的电压时，求在电阻中流动的电流。

答 由 $V=IR$ 得到 $10=I\times2$，两边都除以 2，得 $5=I$，因此 $I=5A$。

2 在 3Ω 的电阻中有 2A 的电流流动。此时施加到电阻上的电压是多少？

答 由 $V=IR$ 可知 $V=2\times3=6$ (V)

3 在某电阻上施加 10V 的电压，有 4A 的电流流动。求此时电阻的大小。

答 由 $V=IR$ 可得 $10=4\times R$，两边除以 4，得 $10/4=R$，故 $R=2.5\Omega$。

必备知识

欧姆定律

虽然不论记住哪一种形式的表达式都行，但为避免记错分母与分子，还是记住 $V=IR$ 形式为好。

4　电阻的合成

要　点

当将两个以上的电阻汇集在一起作为一个电阻来考虑时，将这一个汇集成的电阻称为合成电阻。为求合成电阻的数值应关注电阻的连接方法，对串联连接和并联连接要分别计算，然后再相加合成。在不能分成简单的串联连接、并联连接时，要使用基尔霍夫定律等来计算。

解　释

串　联

串联

如图 1.7 所示，将各个电阻连接成一列，称这种连接方式为**串联**。串联连接的合成电阻等于各个电阻之和：

$$R=R_1+R_2+\cdots+R_n$$

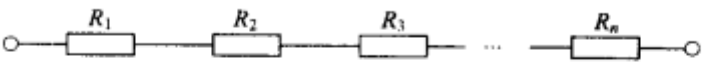


图 1.7　电阻的串联

并　联

并联

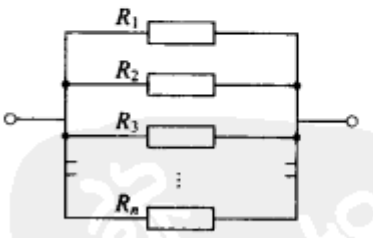


图 1.8　电阻的并联

如图 1.8 所示，将各个电阻并排连在一起，称这种连接方式为**并联**。并联连接的合成电阻的倒数等于各个电阻的倒数之和：

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\cdots+\frac{1}{R_n}$$

积除以和

由此可知，在求合成电阻时可再取其倒数。特别是在两个电阻的情况下，可按下列两电阻的“**积除以和**”来求得其合成电阻：

$$\left.\begin{aligned}\frac{1}{R}&=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}=\frac{R_2}{R_1R_2}+\frac{R_1}{R_1R_2}\\&=\frac{R_1+R_2}{R_1R_2}\\R&=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}=\frac{\text{积}}{\text{和}}\end{aligned}\right\}\tag{1.2}$$

串并联

串并联

如图 1.9 所示，称串联与并联组合在一起的连接方式为**串并联**。为求图 1.9 所示情况的合成电阻，可先简单地求出右部分并联电阻的合成电阻 R_R，然后再求其与左部的电阻 R_1 的合成电阻：

$$\frac{1}{R_R}=\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}=\frac{R_3}{R_2R_3}+\frac{R_2}{R_2R_3}$$

$$=\frac{R_2+R_3}{R_2R_3}$$

$$R_R=\frac{R_2R_3}{R_2+R_3}$$

$$R=R_1+\frac{R_2R_3}{R_2+R_3}$$

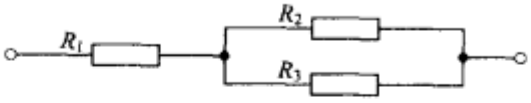


图 1.9 电阻的串并联

压 降

压降

如图 1.10 的电路所示，电阻上是按欧姆定律关系分配电压的。从电源电压看过来，每通过一个电阻，电压就会下降。将这种电压降落称为**压降**。

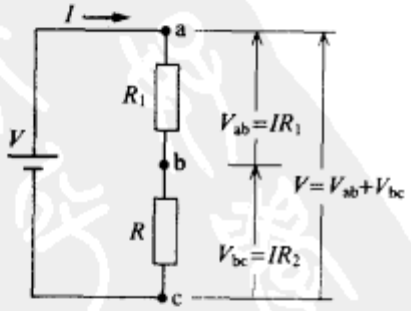


图 1.10 压降[1)]

再有，串联电路的电源电压与各电阻的压降之和相等：

1) 这里规定的电压参考方向是由低电位指向高电位的，与中国规定相反。本书系采用原图，请读者注意，下同。——译者注

$$V=V_1+V_2=R_1I+R_2I$$

分　压

在图 1.10 所示的串联电路中，电源电压与各电阻上产生的电压之和相等。将其从电阻这一方面来看，由于是将电源电压进行了分配，因此称作由各个电阻分压。各电阻上的电压分别为 $V_1=R_1I$，$V_2=R_2I$。可以看出，各个电阻上分配的电压之比，与各电阻值之比相等：

$$V_1:V_2=R_1I:R_2I=R_1:R_2$$

令全部电压为 V，则各电阻上的电压可用电阻值表示如下：

$$V_1=\frac{R_1}{R_1+R_2}V,\quad V_2=\frac{R_2}{R_1+R_2}V$$

分　流

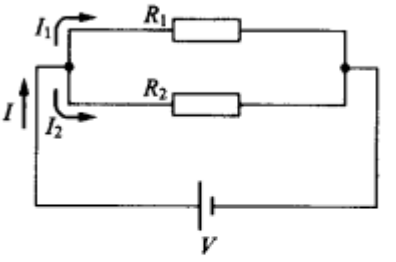


图 1.11　分流示例

分流

在图 1.11 所示的并联电路中，施加到各电阻上的电压等于电源电压。

然而，从电源流出的电流则分别流动于各电阻之中，称此为**分流**。分流电流的总和等于电源流出的电流。

对图 1.11 所示，则有

$$I=I_1+I_2$$

此外，如果能知道各个电阻值和总电流值，则可由下式得知各电阻中所流的电流数值：

$$I_1=\frac{V}{R_1},\quad I_2=\frac{V}{R_2},\quad I=\frac{V}{R}\quad (R\text{ 为合成电阻})$$

由此可知

$$I_1:I_2:I=\frac{V}{R_1}:\frac{V}{R_2}:\frac{V}{R}$$

$$=\frac{1}{R_1}:\frac{1}{R_2}:\frac{1}{R}$$

由电流之比 $I_1:I_2:I$，可求得下列各式：

$$I_1=\frac{R}{R_1}I,\quad I_2=\frac{R}{R_2}I$$

即

$$I_1=\frac{R_2}{R_1+R_2}I$$

$$I_2=\frac{R_1}{R_1+R_2}I$$

例 题

[1] 试求图 1.12 所示电路的合成电阻。

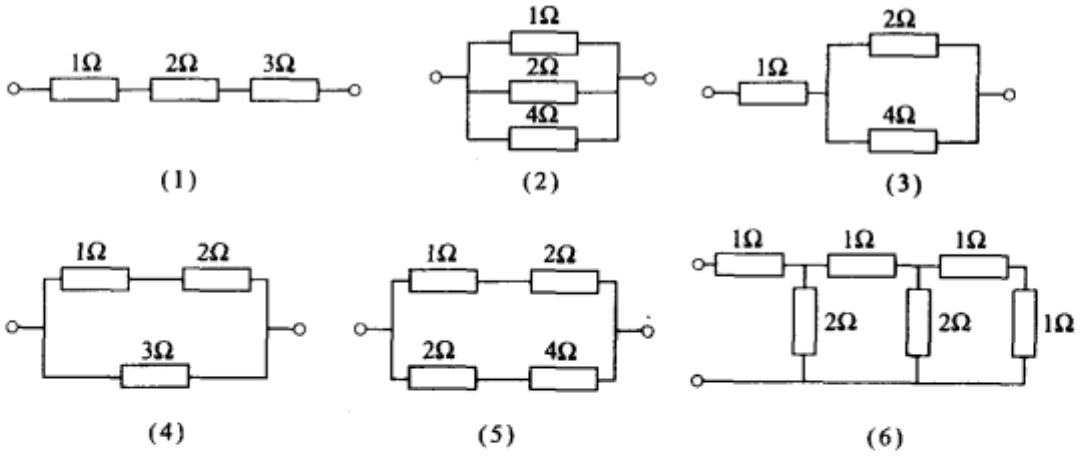


图 1.12　求合成电阻

答　(1) $R=1+2+3=6$ (Ω)

(2) $\frac{1}{R}=\frac{1}{1}+\frac{1}{2}+\frac{1}{4}=\frac{4+2+1}{4}=\frac{7}{4}$，则 $R=\frac{4}{7}=0.571\cdots$约 0.57Ω

(3) 首先，求右边并联部分的合成电阻：

$\frac{1}{2}+\frac{1}{4}=\frac{2+1}{4}=\frac{3}{4}$，则$\frac{4}{3}=1.33\cdots$约 1.33Ω

再加上左边的电阻：$1+1.33=2.33\cdots$约 2.33Ω

(4) 先计算上边串联的部分：$1+2=3\Omega$，再与下边的 3Ω 电阻并联，故有

$\frac{1}{3}+\frac{1}{3}=\frac{1+1}{3}=\frac{2}{3}$，则$\frac{3}{2}=1.5\Omega$

(5) 先计算上边串联部分和下边串联部分：$1+2=3\Omega$；$2+4=6\Omega$，再将两者并联，故有下列结果：

$$\frac{1}{3}+\frac{1}{6}=\frac{2+1}{6}=\frac{3}{6}\text{，则}\frac{6}{3}=2\Omega$$

(6) 先计算右端的串联部分：$1+1=2\Omega$，再向左进行与 2Ω 电阻的并联，则有

$$\frac{1}{2}+\frac{1}{2}=\frac{1+1}{2}=\frac{2}{2}\text{，则}\frac{2}{2}=1\Omega$$

进而再向左将此与 1Ω 电阻串联，则有 $1+1=2\Omega$。同理，重复计算并联，结果得 1Ω，最后由于是与 1Ω 电阻串联，故有 $1+1=2\Omega$。

[2] 在图 1.11 所示电路中，当 $R_1=2\Omega$，$R_2=3\Omega$，总电流 $I=1\text{A}$ 时，求 I_1、I_2 的值。

答　$I_1=\dfrac{3}{2+3}\times1=0.6\ (\text{A})$，　$I_2=\dfrac{2}{2+3}\times1=0.4\ (\text{A})$

必备知识

串联连接的合成电阻

合成电阻 R 为各电阻之和，即

$$R=R_1+R_2+\cdots+R_n$$

并联连接的合成电阻

合成电阻 R 等于所求各电阻的倒数之和的倒数，即

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\cdots+\frac{1}{R_n}$$

其他复杂的合成电阻

先着眼于求出易求的小部分的合成电阻。进而将其与外侧的电阻合成，求总的合成电阻。

分　压

在串联电路中，各电阻上的压降之比等于各电阻之比。

分　流

在并联电路中，各电阻中流过的电流之比等于各电阻的倒数之比。

5　导电材料与电阻率(电导率、电阻的温度变化)

要　点

通常，在导电的物体中都有一定的电阻。导体的电阻随材质与形状的不同而异。某一材料 $1m^3$ 的立方体，其相对面之间所具有的电阻，称为电阻率。此外，电阻的数值还随温度而变化，相当于温度每变化 1℃ 所引起的电阻变化的比率称为电阻的温度系数。

解　释

导体与非导体(绝缘体)

能够导电良好的物体称为导体，几乎不导电的物体称为绝缘体。而硅或锗等在一定的条件下，既能导电也能不导电，这样的物体称为半导体。

下面列出各类有代表性的物体。不过，不包括导电性的塑料等特殊物体。

导体——金，银，铜，铝，铁等金属。

半导体——硅，锗，硒等。

绝缘体——橡胶，树脂，大理石，玻璃，空气等。

电阻率

电阻率
欧[姆]米

将图 1.13 所示每边 1m 的立方体的电阻称为该导体的**电阻率**，以符号 ρ 表示。其单位用**欧[姆]米**(Ω·m)表示。因此，像图 1.14 所示导体的电阻与长度成正比，与截面积成反比，有下式成立：

$$R=\rho\frac{l}{A}$$

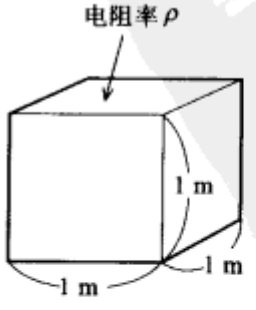


图 1.13　电阻率的定义

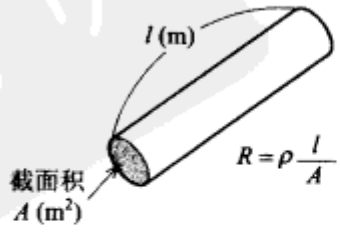


图 1.14　导体的电阻

有代表性的导体的电阻率见表1.2。

表1.2　导体的电阻率与20℃时的温度系数

金　属	$\rho(\Omega\cdot m)\times10^{-8}$	$\alpha_{20}(℃)\times10^{-3}$
金	2.22	3.4
铂	10.6	3.0
银	1.59	3.8
铜	1.69	3.9
铝	2.27	3.9
铁	10.1	5.0
钨	5.38	4.5

电导率

西[门子]每米

再有，电阻率的倒数称为**电导率**，用符号 σ 表示。其单位为**西[门子]每米**(S/m)。

$$\sigma=\frac{1}{\rho}$$

电阻的温度系数

电阻的温度系数

导体的电阻数值随温度而变化。将温度每上升1℃时电阻所增加的比率称为**电阻的温度系数**。为掌握准确的电阻数值，要使用温度系数来修正。若作为基准的温度为 T_1，此时的电阻值为 R_1，温度系数为 α_1，则在某一温度 T_2 时的电阻值 R_2 如下式所示：

$$R_2=R_1[1+\alpha_1(T_2-T_1)]\ (\Omega)$$

$T_1=20℃$ 时的温度系数 α_{20} 如表1.2所示。

例　题

1 试求直径1mm、长100m的铜线的电阻。已知铜的电阻率为 $1.69\times10^{-8}\Omega\cdot m$。

答 因为直径为1mm，故半径为0.5mm。而面积为 πr^2，故截面积为

$$A=3.14\times(0.5\times10^{-3})^2=0.758\times10^{-6}\ (m^2)$$

因此，电阻为

$$\rho\frac{l}{A}=1.69\times10^{-8}\times\frac{100}{0.758\times10^{-6}}=2.23\ (\Omega)$$

2 在20℃时具有100Ω电阻的铜线，在40℃时电阻等于多少？已知铜在20℃时的温度系数 α_{20} 的数值为 3.9×10^{-3}。

答 $R=100[1+3.9\times10^{-3}\times(40-20)]=100\times1.078=107.8$ (Ω)

应用知识

线电阻

一般的电线等导体,可认为其粗细是一定的,因此可以用其长度来计算电阻,即采用线电阻 R_0,它表示每 1m 的电阻数值,单位为 Ω/m。计算式为

$$R=R_0\times l \quad (l \text{ 为导线的长度})$$

面电阻(板电阻)

对于厚度一定的导体板,采用面电阻 R_s 来计算其电阻较为简便。其单位为 Ω,用若干个放置的正方形来计算电阻数值。即

$$R=R_s\times S_q \quad (S_q \text{ 为正方形的数目})$$

必备知识

电阻率

$$R=\rho\frac{l}{A}$$

导体的电阻与其长度成正比,与其截面积成反比。

电导率(电阻率的倒数)

$$\sigma=\frac{1}{\rho}$$

电阻的温度系数

温度每上升 1℃时的电阻的增长比率。当基准温度为 T_1、电阻为 R_1、温度系数为 α_1 时,在温度 T_2 时的电阻值 R_2 为:

$$R_2=R_1[1+\alpha_1(T_2-T_1)] \quad (\Omega)$$

6　基尔霍夫定律

要　点

当计算具有多个电源的电路，或是像网孔似的电路网络时，单纯使用欧姆定律是不能解决问题的。计算这样的复杂电路的电流或电压，需要使用基尔霍夫定律。

基尔霍夫定律包括有关电流的第一定律和有关电压的第二定律，综合使用两者就能够解电路。

解　释

第一定律(电流定律)

“在任意的节点上，流入的电流之和等于流出的电流之和”。例如，对图 1.15 有：

$$I_1+I_2+I_3=I_4+I_5$$

此外，若将流入节点的电流以“+”号表示，将从节点流出的电流以“−”号表示，则有

$$I_1+I_2+I_3+(-I_4)+(-I_5)=0$$

换言之可表示为“在任意节点上流入和流出的电流之和为零”。

第二定律(电压定律)

第二定律(电压定律)

“在任意的闭合回路中，电动势之和等于电压降之和”。但是，应规定一个回路的循行方向，并令此方向与电动势、电流方向一致时为“+”，相反时为“−”。例如，对图 1.16 有

$$E_1+E_2=R_1I+R_2I+R_3I$$

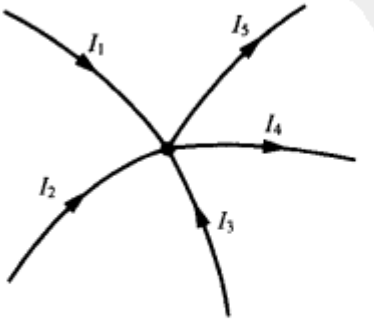


图 1.15　第一定律

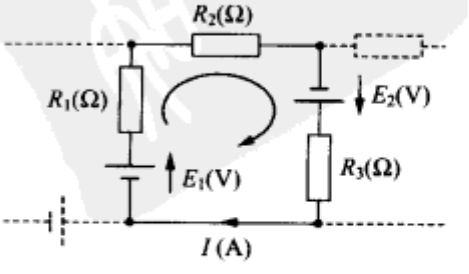


图 1.16　第二定律

基尔霍夫定律的应用

试用基尔霍夫定律求图 1.17 所示电路中各电阻的电流 I_1、I_2、I_3。

①设定在回路中流动的电流(如图 1.17 中箭头所示)。

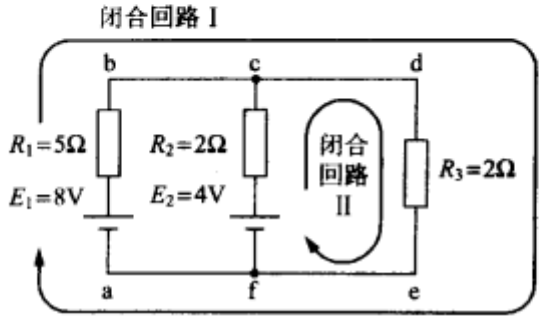


图 1.17　基尔霍夫定律的应用

②对 c 点用第一定律,有

$$I_1+I_2=I_3 \tag{1.3}$$

③对闭合回路 I (a→b→d→e→a)用第二定律,有

$$E_1=R_1I_1+R_3I_3$$

$$8=5I_1+2I_3 \tag{1.4}$$

④对闭合回路 II (f→c→d→e→f)用第二定律,有

$$E_2=R_2I_2+R_3I_3$$

$$4=2I_2+2I_3 \tag{1.5}$$

⑤由式(1.3)、式(1.4)、式(1.5),解联立方程式,可求出 I_1、I_2、I_3:

将式(1.3)代入式(1.4),得

$$8=5I_1+2(I_1+I_2)$$

$$8=7I_1+2I_2 \tag{1.6}$$

将式(1.3)代入式(1.5),得

$$4=2I_2+2(I_1+I_2)$$

$$4=2I_1+4I_2 \tag{1.7}$$

式(1.6)×2−式(1.7),得

$$12=12I_1 \quad \text{则 } I_1=1\text{A}$$

将其代入式(1.6),得

$$8=7+2I_2 \quad \text{则 } I_2=0.5\text{A}$$

由以上结果及式(1.3)可知

$$I_3 = 1 + 0.5 = 1.5\ (\mathrm{A})$$

例　题

[1] 试求图 1.18 所示电路各电阻中流动的电流 I_1、I_2、I_3 的大小与方向。

答 $I_1 = 0.14\mathrm{A}$，方向为由 B 流向 A

$I_2 = 0.08\mathrm{A}$，方向为由 B 流向 A

$I_3 = 0.22\mathrm{A}$，方向为由 A 流向 B

[2] 电路如图 1.19 所示，R_2 中流动的电流为 25mA。试求电阻 R_2 及 AB 之间的电位差 V_{AB}。

答 $R_2 = 10\Omega$，$V_{AB} = 0.25\mathrm{V}$（A 点电位为＋，B 点为－）。

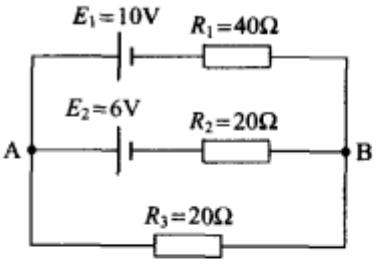


图 1.18　求电流的大小与方向

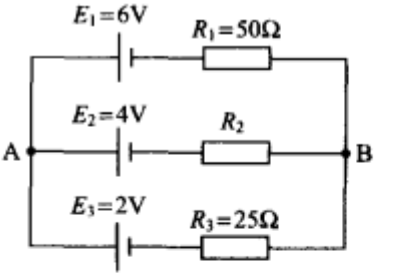


图 1.19　求电位差

相关知识

◆ 桥路

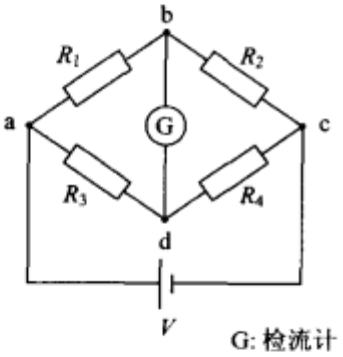


图 1.20　桥路

图 1.20 所示是由 R_1、R_2、R_3、R_4 四个电阻相连构成的电路，在 ac 之间施加直流电压 V(V)，在 bd 之间接以预先设定的电路。上述电路称为桥路。

在这种桥路中，当对角线方向的电阻之积相等（$R_1R_4 = R_2R_3$）时，称为桥路平衡，另外，式子 $R_1R_4 = R_2R_3$ 称为平衡条件。

还有，在桥路平衡时，bd 之间的电流为 0。

例 题

[3] 试求图 1.21 所示电路中的电流 I_1 与 I_2。

答 $I_1=1\text{A}, I_2\approx 0.67\text{A}$

[4] 试求图 1.22 所示电路中的电流 I_1、I_2、I_3 及 ab 之间的电压。

答 $I_1=5\text{A}, I_2=2\text{A}, I_3=0$

$V_{ab}=4\text{V}$

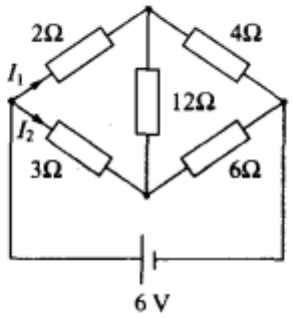


图 1.21 求电流

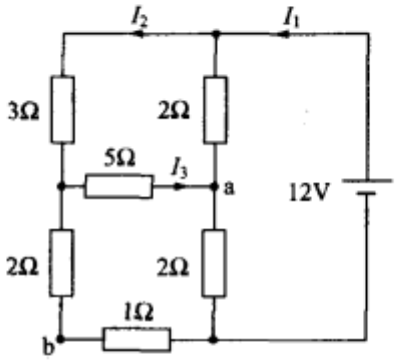


图 1.22 求电流与电位差

7　叠加原理

要　点

具有多个电动势的电路中各部分的电流，等于各个电动势单独存在时所计算出的该部分电流之和。这被称为叠加原理。

解　释

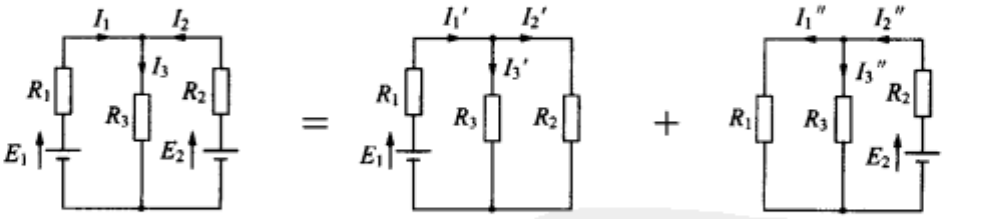
叠加原理

叠加原理

当计算复杂网络中各部分的电压、电流时，除可使用基尔霍夫定律外，还可利用**叠加原理**将电路变换成简单的串联、并联电路，然后用欧姆定律就能够求得解答。

叠加原理的应用

图 1.23(a)所示电路中各部分电流 I_1、I_2、I_3，可由图 1.23(b)所示仅含电源 E_1 的电路与图 1.23(c)所示仅含电源 E_2 的电路中分别求得的相应电流之和而求出。



(a) 两个电源的电路　　(b) 仅含电源E_1的电路　　(c) 仅含电源E_2的电路

图 1.23　叠加原理

这时，应该设定以图 1.23(a)中的电流方向为基准，图 1.23(b)、图 1.23(c)中相应电流的方向若相同则为“+”，若相反则为“−”。

由此，图 1.23(a)所示电路中各电流如下：

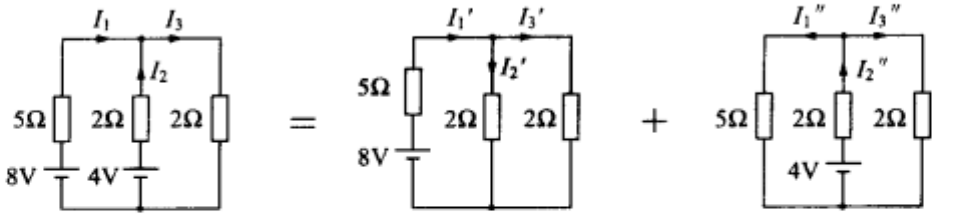
$$I_1 = I'_1 + (-I''_1) = I'_1 - I''_1$$

$$I_2 = (-I'_2) + I''_2 = -I'_2 + I''_2$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3$$

例　题

1　试求图 1.24(a)所示电路中各部分的电流 I_1、I_2、I_3。



(a) 具有 8V、4V 电源的电路　(b) 仅有 8V 电源的电路　(c) 仅有 4V 电源的电路

图 1.24　叠加原理的应用

提示　可将图 1.24(b)变换成图 1.25 所示电路。其合成电阻 R' 为

$$R'=5+\frac{2\times 2}{2+2}=6\ (\Omega)$$

$$I'_1=\frac{8}{6}=\frac{4}{3}\ (\mathrm{A})$$

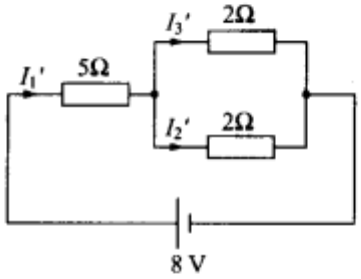


图 1.25　变换的电路

则

$$I'_2=\frac{4}{3}\times\frac{1}{2}=\frac{2}{3}\ (\mathrm{A})$$

$$I'_3=\frac{4}{3}\times\frac{1}{2}=\frac{2}{3}\ (\mathrm{A})$$

同理，由图 1.24(c)求合成电阻有

$$R''=2+\frac{5\times 2}{5+2}=\frac{24}{7}\ (\Omega)$$

则

$$I''_2=\frac{4}{24/7}=\frac{7}{6}\ (\mathrm{A})$$

$$I''_1=\frac{7}{6}\times\frac{2}{5+2}=\frac{1}{3}\ (\mathrm{A})$$

$$I''_3=\frac{7}{6}\times\frac{5}{5+2}=\frac{5}{6}\ (\mathrm{A})$$

因此，各部分的电流为

$$I_1=I'_1-I''_1=\frac{4}{3}-\frac{1}{3}=1\ (\mathrm{A})$$

$$I_2=-I'_2+I''_2=-\frac{2}{3}+\frac{7}{6}=0.5\ (\mathrm{A})$$

$$I_3=I'_3+I''_3=\frac{2}{3}+\frac{5}{6}=1.5\ (\mathrm{A})$$

8　戴维南定理

要　点

所谓戴维南定理，就是可将由多个电源和电阻构成的复杂网络等效变换成一种简单的电路（电源与电阻的串联电路）的定理。

解　释

戴维南定理

设网络中任意两点间的开路电压为 V，并设网络中所有电源短路时由此两端看入的内部电阻为 r，则此网络的等效电路为由电压 V 与内阻 r 构成的串联电路，如图 1.26 所示。

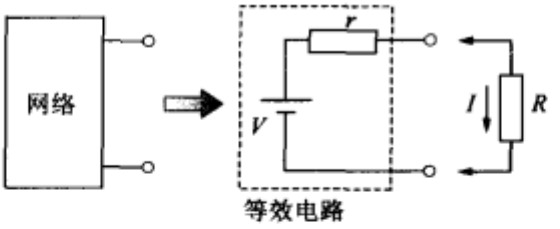


图 1.26　戴维南定理

再有，当在此两点间外接电阻 R 时，在 R 中流动的电流 I 为：

$$I=\frac{V}{r+R}\ (\mathrm{A})$$

戴维南定理的应用

在图 1.27 所示的电路中，将去掉 R_3 的电路变换成戴维南等效电路。

ab 间的开路端电压 V，可从 V_1 减去 R_1 上的压降而得到。

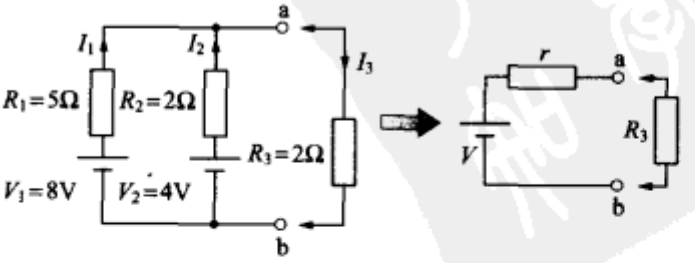


图 1.27　戴维南定理的应用

$$V=V_1-R_1\left(\frac{V_1+V_2}{R_1+R_2}\right)$$

$$=\frac{V_1R_2+V_2R_1}{R_1+R_2}=\frac{36}{7}\ (\mathrm{V})$$

另外，求内阻 r 时因假定 V_1、V_2 短路，故为 R_1 与 R_2 的并联：

$$r=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}=\frac{10}{7}\ (\Omega)$$

因此，I_3 可由戴维南定理求得为

$$I_3=\frac{V}{r+R_3}=\frac{\frac{36}{7}}{\frac{10}{7}+2}=1.5\ (\mathrm{A})$$

利用基尔霍夫定律也能求得同样的结果。

例 题

[1] 试求图 1.28 所示电路中流过 20Ω 电阻中的电流 I。

答 20Ω 电阻开路时的端电压 $V=30\mathrm{V}$，由此二端看入网络的内部电阻 $r=20\Omega$，则

$$I=\frac{30}{20+20}=0.75\ (\mathrm{A})$$

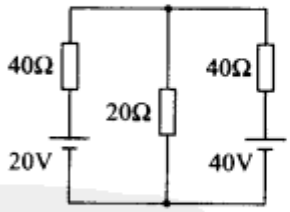


图 1.28 利用戴维南定理求电流

9　电功率与电能

要　点

电能在单位时间内所做的功称为电功率，其单位用 W（瓦[特]）表示。在电阻 $R(\Omega)$ 中流动的电流为 $I(A)$ 时所产生的电功率 $P(W)$ 可表示如下：

$$P=RI^2 \quad (W)$$

再有，电流在一定时间内所做的功称为电能，其单位用 J（焦[耳]）表示。若电功率为 $P(W)$、时间为 $t(s)$，则经过 t 秒时间的电能 $W(J)$ 可用下式表示：

$$W=Pt \quad (J)$$

解　释

功率与电压、电流、电阻之间的关系

由欧姆定律可知，有电流 $I=V/R$ 的关系，故功率 $P(W)$ 可表示如下：

$$P=VI=\frac{V^2}{R} \quad (W)$$

电能的单位

瓦[特]·秒

千瓦·时

电能的单位为 W·s（**瓦[特]·秒**），1J＝1W·s。然而，一般使用电能时需求量很大，因此又将用 1kW 的功率使用 1h 所耗电能作为单位，以 1kW·h（**千瓦·时**）表示。

$$1kW\cdot h=1000W\times 1h=1000W\times 3600s$$
$$=3.6\times 10^6 W\cdot s=3.6\times 10^6 J$$

例　题

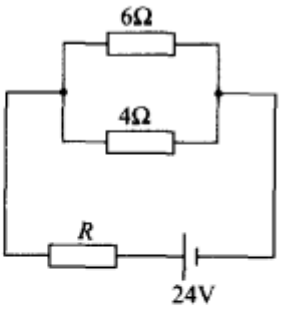


图 1.29　求消耗的功率

[1] 在电热器上施加 100V 的电压有 5A 电流流动。回答下列问题：

(1) 此电热器的功率 P 是多少(W)？

(2) 使用此电热器 2h 后所耗电能 W 是多少(kW·h)？

答　(1) $P_1=UI=100\times 5=500$ (W)

(2) $W=Pt=500\times 2=1000W\cdot h=1kW\cdot h$

[2] 图 1.29 所示电路中电阻 R 为 4Ω，求 R 所

消耗的功率。

答　R 中流动的电流 I 为：

$$I=\frac{24}{4+\dfrac{4\times 6}{4+6}}=3.75\ (\mathrm{A})$$

因此，由 R 所消耗的功率 P 为：

$$P=RI^2=4\times 3.75^2=56.25\ (\mathrm{W})$$

相关知识

◆ 导线的允许电流

由于导线上有电阻，所以当有电流流动时就会产生焦耳热，使温度上升。结果会导致导体表面被氧化，乙烯树脂、橡胶等绝缘物被熔化，严重时还可能造成导线本身熔断。

为了防止这些情况的发生，应确定安全使用导线的最大电流，称其为允许电流。

导线的允许电流随导线的种类和粗细的不同而异，也会受周围温度的影响。表 1.3 中所示为铜绝缘导线的允许电流示例。

表 1.3　铜绝缘导线的允许电流

单　线	
直径/mm	允许电流/A
1.0 以上，不足 1.2	16
1.2 以上，不足 1.6	19
1.6 以上，不足 2.0	27
2.0 以上，不足 2.6	35
2.6 以上，不足 3.2	48

定型单线与绞线	
截面积/mm^2	允许电流/A
0.9 以上，不足 1.25	17
1.25 以上，不足 2	19
2 以上，不足 3.5	27
3.5 以上，不足 5.5	37
5.5 以上，不足 8	49

10　电流的热效应

要　点

通过电流的作用而每秒产生的热量，与电流的平方和电阻的乘积成正比。这称为焦耳定律，可用下式表示：

$$Q=RI^2t\ (\mathrm{J})$$

热电偶是利用塞贝克效应产生的热电动势来测量温度的机构。

电子冷却元件则是利用珀尔帖效应导致接触点吸热的物体。

解　释

焦耳定律

电热器中流过电流时会发热。这是由于电热器的电阻中所流动的电流作用所致。这样，人们就将电流通过具有电阻的导体时所产生热的现象称为**电流的热效应**。

电流的热效应

英国的物理学家焦耳对由电流作用而产生的发热量进行了大量研究，他在1840年发现“由电流作用而每秒产生的热量，与电流的平方和电阻的乘积成正比”。后人称此为**焦耳定律**，并称产生的热为**焦耳热**。

焦耳定律

焦耳热

在图1.30所示电路中，电阻$R(\Omega)$中的电流$I(\mathrm{A})$经过时间$t(\mathrm{s})$所产生的热量$Q(\mathrm{J})$如下式所示：

$$Q=RI^2t\ (\mathrm{J})$$

式中，热量的单位符号用J表示，称为焦[耳]，系为纪念发现者而命名的。

在1个气压下1g的水升高1℃温度时所必需的热量为4.2J。

塞贝克效应

使图1.31所示的两种金属接触，并令两个接触点有一定的温度差，结果会产生电动势从而有电流流动。这种现象称为**塞贝克效应**，这是1821年由德国的塞贝克发现的。

塞贝克效应

我们将上述产生的电动势称为热电动势，将所流的电流称为热电流。热电动势的大小随接触点的温度差、组合金属的种类而异。表1.4中表示各种金属与铂组合所产生

热电动势　　的热电动势。

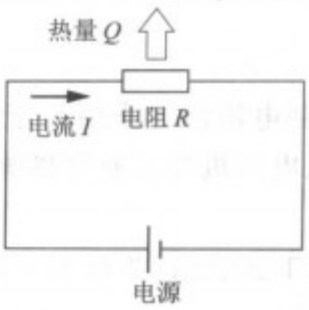


图 1.30　焦耳热



图 1.31　塞贝克效应

表 1.4　各种不同金属与铂组合所产生的热电动势

金　属	热电动势/mV
锑	+4.89
铁	+1.98
锌	+0.75
铜	+0.76
锰铜(铜、锰、镍合金)	+0.61
镍	−1.48
康铜(铜、镍合金)	−3.51
铋	−7.34

摘自《理科年表(2005 年版)》

(表的用法)



表中所示(+)、(−)号的意义为电流从铂通过高温接点流向表中金属的方向为(+).

珀尔帖效应

将图 1.32 所示两种不同的金属相接触并通以电流，则会出现在一个接触点上发热而在另一接触点上由于温度下降而吸热的现象。这种现象称为**珀尔帖效应**，是 1834 年由法国的珀尔帖所发现的。

珀尔帖效应



图 1.32　珀尔帖效应

如果电流的方向相反，接触点的发热与吸热也会变换。发热与吸热的热量与电流的大小成正比。

相关知识

◆ 焦耳热的利用

利用焦耳热作为热源，由于可控制电流的大小而易于调节温度，故在电暖气或电饭锅等家用电器中，以及电炉、电焊机等工业用热源中得到广泛应用。

◆ 热量与电能的关系

热量 Q 可利用 $V=IR$、$P=VI$ 用下式表示，并有 1J＝1W·s 的单位关系：

$$Q=RI^2t(\mathrm{J})=VIt(\mathrm{J})=Pt\ (\mathrm{J})$$

◆ 热量的变换

热量的单位也可用卡[路里](cal)表示。1cal 表示在 1 个大气压下 1g 的水升高 1℃时所需要的热量。焦[耳]与卡[路里]的关系为：

$$1\mathrm{cal}=4.186\mathrm{J}\approx4.2\mathrm{J}$$

$$1\mathrm{J}=0.239\mathrm{cal}\approx0.24\mathrm{cal}$$

◆ 热电偶

图 1.33 表示利用塞贝克效应测量温度的热电偶的原理。即便令低温侧接触点打开，接入其他金属 C，只要金属 C 两端接触点的温度相同，则产生的热电动势数值不变。人们称此为中间金属的定则。

根据这个定则，像图 1.34 所示那样接入测量仪表对热电动势没有影响。因此，只要选择适当的热电偶，预先测知其相对于接触点温度的热电动势，令测量仪表带有温度刻度，就可测量温度。

具体说来，铜-康铜热电偶能测 −200～300℃，铂-铂铑热电偶能测 200～1400℃的温度。



图 1.33　热电偶的原理

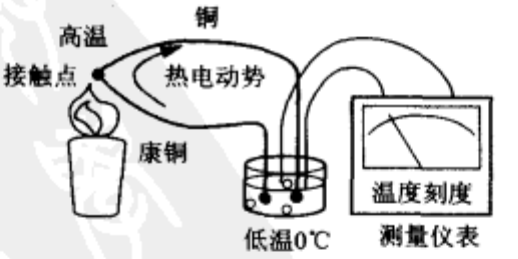
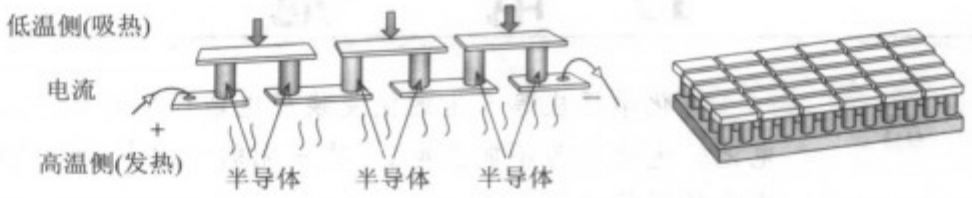


图 1.34　利用热电偶测量温度

◆ 电子冷却元件

当打算利用珀尔帖效应产生的温度差时，与其使用金属不如使用热传导率低的半导体。锑(Sb)与铋(Bi)是最易呈现塞贝克效应的半导体组合，其珀尔帖效应也很大。图 1.35 表示利用此效应的电子冷却元件。通常在 CPU 冷却器、

电子冷库等器具中得到应用。



(a) 原理　　(b) 元件示例

图 1.35　电子冷却元件

例 题

1 在20Ω的电阻上施加100V电压5min，其发热量是多少焦？另外，这些热量能够使1L20℃的水温度上升多少度？

答 在电阻中流动的电流 I 为：

$$I=\frac{V}{R}=\frac{100}{20}=5\ (\mathrm{A})$$

电流 I 流过的时间 t 为：

$$t=5\times60=300\ (\mathrm{s})$$

由此可知发热量 Q 为：

$$Q=RI^2t(\mathrm{J})=20\times5^2\times300=150\ 000\ (\mathrm{J})$$

因为1g水温度升高1℃需要的热量为4.2J，故水温若升高 T(℃)，按水1L=1000g，则有

$$1000\times(T-20)=150\ 000/4.2$$

因此

$$T=55.7$$

即1L水的温度可升高到55.7℃。

11　电　　池

要　点

将化学反应等产生的能变换成电能而使用的装置，称为电池。电池分为不能充电、一次用完的一次电池和能够反复充电使用的二次电池。

解　释

一次电池的原理

如图 1.36 所示，在稀硫酸（H_2SO_4）中放入铜（Cu）板和锌（Zn）板的装置，称为**伏打电池**。

伏打电池

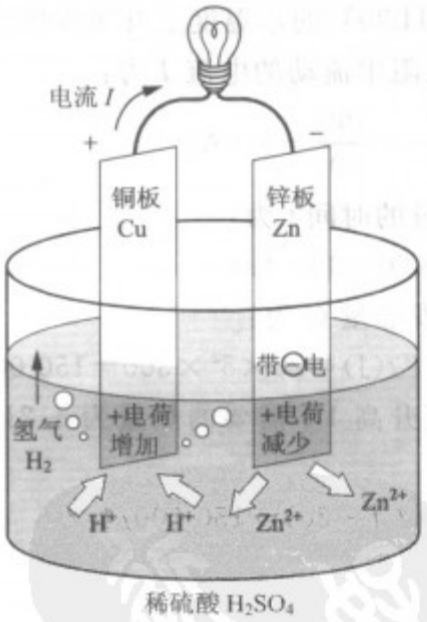


图 1.36　伏打电池

由于锌比铜的电离性强，其“—”部分溶为带有“+”电荷的锌离子（Zn^{2+}），剩余的电子（$2e^-$）经导线传入铜板。即铜板为+，锌板为—，在两电极间产生约 1.1V 的电动势。

流到铜板上的电子，虽是使氢离子（H^+）还原成氢气（H_2）所需要的，但不久此附着的氢气又会取得“+”电荷，重新变成离子，因此在铜板上残留的电子将会把从锌板传过来的电子顶回去，使电流不能流通，这种现象称为**极化作用**。

极化作用

图 1.37 表示典型的一次电池示例，即锰电池的构造。

这种电池是把碳棒与二氧化锰和电解液的溶合剂作为正极，把锌筒作为负极，产生的电动势约 1.5V。

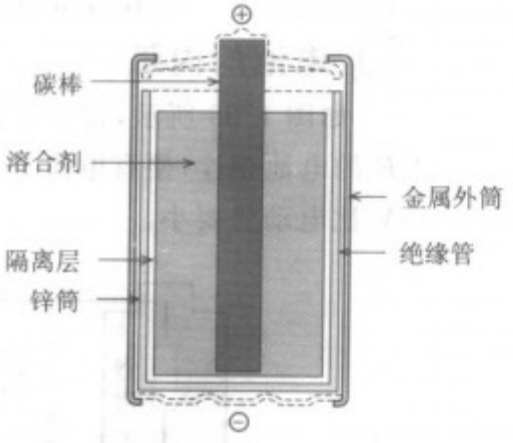


图 1.37　锰干电池的构造

二次电池(铅蓄电池)的原理

如图 1.38 所示，铅蓄电池是用比例为 1.2～1.3 的稀硫酸(H_2SO_4)作为电解液，以二氧化铅(PbO_2)为正极，以铅(Pb)为负极。

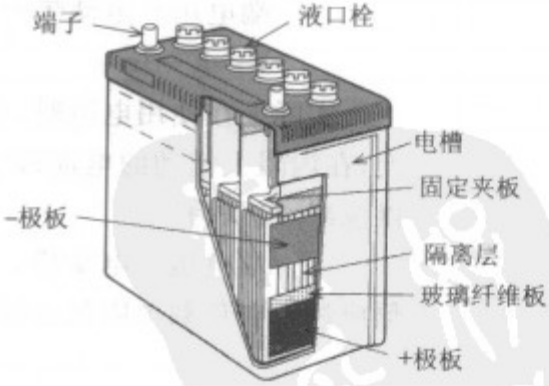


图 1.38　铅蓄电池

铅蓄电池的化学反应式如下所示：

$$\overset{(+极)}{PbO_2}+2\overset{(电解液)}{H_2SO_4}+\overset{(-极)}{Pb}\underset{充电}{\overset{放电}{\rightleftharpoons}}\overset{(+极)}{PbSO_4}+2\overset{(水)}{H_2O}+\overset{(-极)}{PbSO_4}$$

充电
放电

充电完毕后的电动势约为 2.1V，随着**放电**的进行电动势会下降，放电的临界电动势为 1.8V 左右。二次电池也不能永久使用，当进行了若干次充、放电后，由于电池极板等会老化，其作用便会衰减。

铅蓄电池的容量，用能够放电的电流大小与时间的乘积来表示，其单位为 A・h(安[培]・小时)。例如，以 6A 的电流放电 10h，其容量为 60A・h。

电池的内阻

如图 1.39 所示，将小灯泡等的负载电阻 R 与电动势为 E 的电池相连，便有电流 I 流动，这时实际上电池的**端电压** V 比电动势要小。

端电压

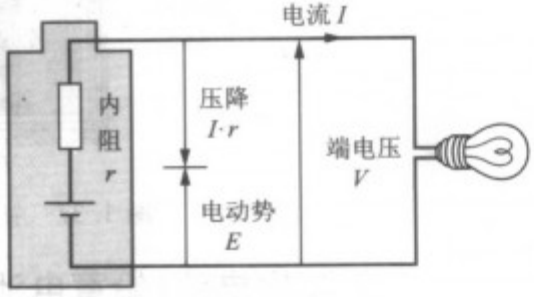


图 1.39　电池的内阻

这是因为电池内部存在着数值不大的电阻 r，当电流流过其上时会产生压降 $I \cdot r$。此电阻被称为**电池内阻**。

电池内阻

端电压＝电动势－电流×电池内阻

$$V = E - Ir$$

实际上在使用电池时，由于与电池相连的负载电阻很大，在内阻上流动的电流较小，压降也很小，故上述情况可以忽略，可认为

端电压＝电动势

但应注意在负载电阻很小时，就需要加以考虑内阻的影响。

例　题

1　铅蓄电池以 5A 的固定电流放电 8h 后，其电动势变为 1.8V。此蓄电池的容量是多少？

答　5A×8h＝40A・h

2　在有 2.5A 电流流动的电路中，若使用 60A・h 的铅蓄电池，能工作多长时间？

答　60A・h÷2.5A＝24h

必备知识

图 1.40、图 1.41 表示电池串、并联后总电动势与总电阻的关系。

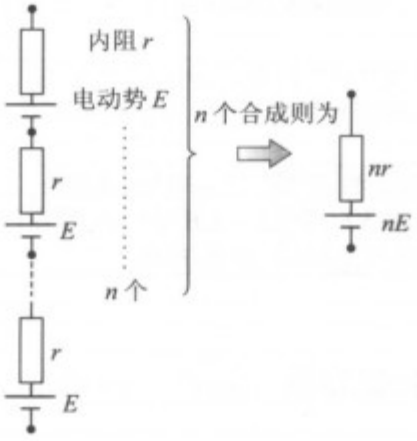


图 1.40　电池串联

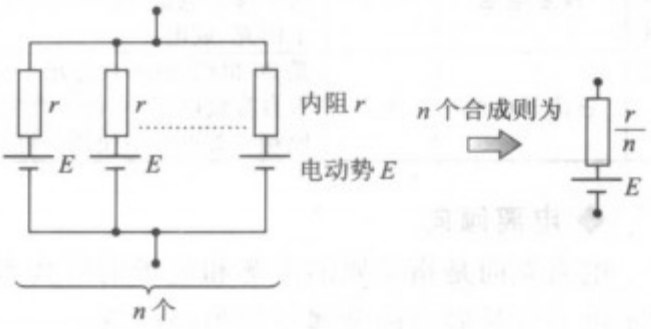


图 1.41　电池并联

相关知识

◆ 主要电池的种类

电池的种类如表 1.5 所列。

表 1.5　电池的种类

	种　类	额定电压/V	特　点
一次电池	锰干电池	1.5	一极兼作筒容器，过放电会导致筒破漏液。仅偶尔在随身电筒、钟表等小电流电器中使用
	碱性干电池	1.5	比锰干电池寿命长，在大容量情况下压降小，在头戴立体声耳机、闪光灯等电器中使用
	氢氧化锂干电池	1.5	作为筒形干电池经 40 年之后的新型干电池，其寿命为碱性干电池的 1.5～2 倍。在数码相机等耗电较大的电器中适用
	锂电池	3.0	每个容积的电能量相当于锰干电池的 10 倍，电压也稳定。广泛使用于照相机、电子笔记本、计算机等电器中
	碱性伏打电池	1.5	性能高、价格低，多用于电子玩具、桌式计算机、照相器具等
	氧化银电池	1.55	电压稳定，在快达到寿命之前都能保持最初的电压。有厚度仅 2mm 以下的产品，适合使用于手表等
	空气锌电池	1.4	替代因环境问题而停止制造的水银电池，用于助听器等电器中。剥开塞住的气孔即开始发电

续表 1.5

	种　类	额定电压/V	特　点
二次电池	镍镉电池	1.2	适用于无线电操纵仪、电动工具等需要大功率的电器。可进行 500 次以上的充、放电
	镍氢电池	1.2	与镍镉电池相比，可以更高的容量持续放电，时间约可达 2 倍。适用于移动电话、数码相机等长时间使用的电器。可进行 500 次以上的充、放电
	锂离子电池	3.7	是 20 世纪 90 年代才出厂的新电池，使用持续时间长，质量轻。具有自身放电率小、也不产生存储效应等优点，在移动电话、摄像机、照相机等电器中使用。可进行 500 次以上的充、放电

◆ 电离倾向

电离倾向是指金属的溶解和电子的脱离都比较容易。如图 1.42 所示，它表示电子容易脱离的金属可能为⊖电极。

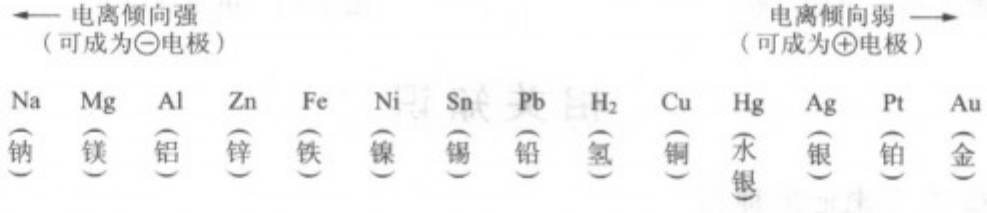


图 1.42　具有代表性的电离倾向

第 2 章

静电与磁

● 责任编委
大石清彦
● 执　　笔
大石清彦(1～13)

静电与磁是电磁学体系中不可或缺的内容，完全可从理论上来加以说明，然而对初学者或已学过的人来说，经过不长时间以后，也许就不那么熟悉了。其主要原因是,在电磁学中，为了能够进行理论说明，难以理解的数学公式较多，在静电现象或磁现象中还存在着不可思议或是难以引起人们兴趣的领域。为此,在这里将对最重要的事项给予简单的说明，在理论说明方面也力求简单易懂。首先，希望在本章中对全部静电与磁的内容的学习能够循序渐进。在短时间内可以浏览电磁学的全部概要，进一步理解之后倘还有兴趣,就可再去查阅有关专门著作。

1　库仑定律

要　点

关于静电场的库仑定律是指“在两个点电荷间所产生的静电力的大小，与此两点电荷所带的电量之积成正比，与此两电荷间距离的平方成反比”。

令两点电荷所带电量为 Q_1、Q_2(C)，其间距为 r(m)，在两电荷间作用的静电力为 F(N)，则库仑定律可表示如下：

$$F=k\frac{Q_1Q_2}{r^2}\ (\mathrm{N})$$

解　释

在真空中和在介质中的库仑定律

库仑定律表达式中的 k 是比例系数，这要由点电荷所在的场是在真空中还是在某种介质中来确定。如用国际单位制(SI)来表示库仑定律，则有

在真空中：　$F=\dfrac{Q_1Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}=9\times10^9\times\dfrac{Q_1Q_2}{r^2}\ (\mathrm{N})$

在一般介质中：　$F=\dfrac{Q_1Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}=9\times10^9\times\dfrac{Q_1Q_2}{\varepsilon_s r^2}\ (\mathrm{N})$

相对介电常数

式中，ε_s 为**相对介电常数**(见图 2.1)

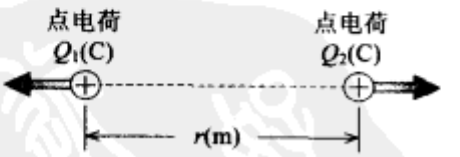


图 2.1　两个点电荷之间的作用力

相关知识

◆ 真空介电常数

现在各种单位均采用国际单位制，当点电荷之间的介质为真空时，根据库仑定律定义的比例系数 k 可表示如下：

$$k=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}=9\times10^9$$

式中，ε_0 为真空中的介电常数，是自然常数之一，由下式确定：

$$\varepsilon_0=\frac{10^7}{4\pi c^2}=8.854\times10^{-12}\ (\mathrm{F/m})$$

$c=2.998\times10^8\ \mathrm{m/s}$(真空中的光速)

例 题

[1] 两个点电荷的 $Q_1=2\times10^{-6}\mathrm{C}$、$Q_2=3\times10^{-6}\mathrm{C}$，彼此相距 3m 放置于真空中，试求此两电荷间的静电作用力。

答 根据库仑定律：

$$F=9\times10^9\times\frac{Q_1Q_2}{r^2}=9\times10^9\times\frac{2\times10^{-6}\times3\times10^{-6}}{3^2}=6\times10^{-3}\ (\mathrm{N})$$

[2] 如图 2.2 所示，在真空中放置三个点电荷，$Q_1=2\times10^{-7}\mathrm{C}$，$Q_2=-3\times10^{-7}\mathrm{C}$，$Q_3=6\times10^{-7}\mathrm{C}$，此三个点电荷处在一条直线上，$Q_1$ 与 Q_2 相距 $r_1=4\mathrm{cm}$，Q_2 与 Q_3 相距 $r_2=5\mathrm{cm}$，试求相互间的静电作用力。

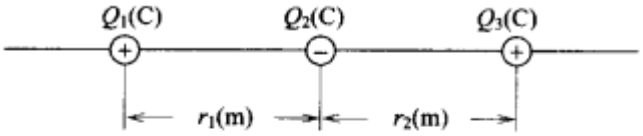


图 2.2 三个点电荷之间的静电作用力

【思路】 各个电荷上受力的方向如图 2.3 所示。

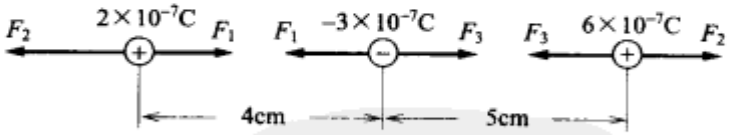


图 2.3 三个点电荷的受力方向

Q_1 与 Q_2 之间的静电力为

$$F_1=9\times10^9\times\frac{2\times10^{-7}\times3\times10^{-7}}{(4\times10^{-2})^2}=0.338\ (\mathrm{N})$$

Q_1 与 Q_3 之间的静电力为

$$F_2=9\times10^9\times\frac{2\times10^{-7}\times6\times10^{-7}}{(9\times10^{-2})^2}=0.133\ (\mathrm{N})$$

Q_2 与 Q_3 之间的静电力为

$$F_3=9\times10^9\times\frac{3\times10^{-7}\times6\times10^{-7}}{(5\times10^{-2})^2}=0.648\ (\mathrm{N})$$

答 以图上所示向右的方向为正，则有

Q_1 上的作用力 $F=F_1-F_2=0.205\ (\mathrm{N})$

Q_2 上的作用力 $F=F_3-F_1=0.31\ (\mathrm{N})$

Q_3 上的作用力 $F=F_2-F_3=-0.515$ (N)

[3] 两个重9g的小球系于12cm长的绳上，当使两小球带上相同的电荷时，系绳在离开垂直位置30°处静止下来(见图2.4)，试求两小球所带电荷。

答 x_1、x、f_h 可分别计算如下：

$$x_1=12\times10^{-2}\text{m}\times\sin30^\circ=6\times10^{-2}\text{m}$$

$$x=2x_1=12\times10^{-2}\text{m}$$

$$f_h=f\tan30^\circ=mg\tan30^\circ=9\times10^{-3}\times9.8\times\tan30^\circ=5.1\times10^{-2}\ (\text{N})$$

据题意

$$f_h=9\times10^9\frac{Q^2}{x^2}=5.1\times10^{-2}\ (\text{N})$$

$$Q^2=\frac{(0.12)^2\times5.1\times10^{-2}}{9\times10^9}=8.16\times10^{-14}$$

所以 $Q=2.9\times10^{-7}$C

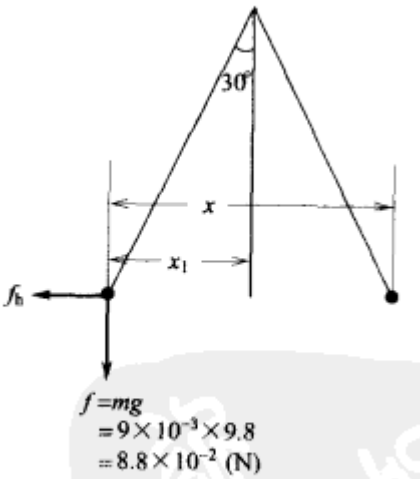


图 2.4　系于绳下的两个小球

2 电场与高斯定理

要 点

电场是指带电物体的周围所形成的电气的场。电场强度的定义为，“当在电场中放置单位正电荷时，此电荷所受力的大小为电场的大小（强度），而此力的方向则为电场的方向”。点电荷 Q(C) 上所受静电力 F(N) 与电场强度 E 的关系为（见图 2.5）

$$E=\frac{F}{Q} \quad (\mathrm{N/C})$$

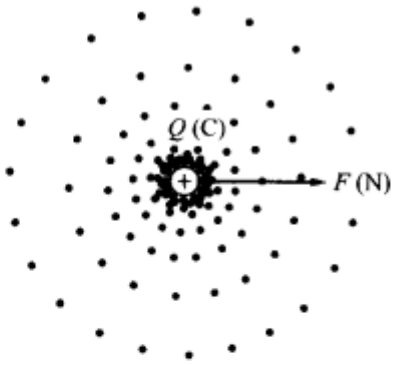


图 2.5 在点电荷上作用的静电力

解 释

电场强度

离开点电荷 Q(C) 距离为 1m 处的电场强度 E(V/m)（见图 2.6）为

在真空中：$E=\dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}=9\times10^9\dfrac{Q}{r^2}$ (V/m)

在一般介质中：$E=\dfrac{Q}{4\pi\varepsilon r^2}=9\times10^9\dfrac{Q}{\varepsilon_s r^2}$ (V/m)

式中，$\varepsilon=\varepsilon_s\varepsilon_0$。

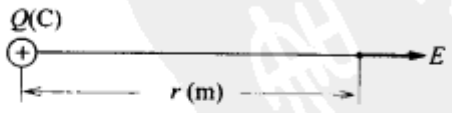


图 2.6 电场强度

高斯定理

高斯定理
电力线

高斯定理的含义是“穿过某一封闭曲面的**电力线**数目，等于此封闭曲面内所包含的电荷总量的 $1/\epsilon$”(见图 2.7)。高斯定理可表示如下：

$$N=\frac{Q:\text{闭合曲面内的电荷总和}}{\epsilon}$$

在真空中：$ES=\dfrac{Q}{\epsilon_0}$

在一般介质中：$ES=\dfrac{Q}{\epsilon}=\dfrac{Q}{\epsilon_r\epsilon_0}$

式中，S 为封闭曲面的表面积。

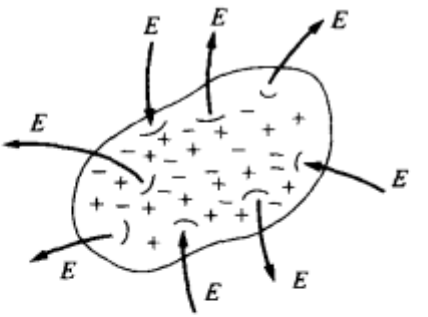


图 2.7　穿出封闭曲面的电力线

作用在点电荷上的静电力

静电力

在电场中放入电荷 Q(C)，将此时的**静电力** F 换算成每+1C 电荷所受的静电力就是电场强度。令电场强度的符号为 E，则有

$$E=\frac{F}{Q}\quad (\text{N/C})$$

电场强度的单位，按其定义虽为 N/C，但实用单位多采用后面所述的 V/m。因此，在电场强度为 E(V/m)的电场中某一点放置的带电量为 Q(C)的点电荷(见图 2.8)上所受的静电作用力 F 为：

$$F=EQ\quad (\text{N})$$

现在来求真空中距点电荷 Q(C)为 r(m)的一点 P 处的电场强度 E(V/m)。如图 2.9 所示，设在 P 点放入电荷 q(C)，作用于其上的作用力为 F，则由库仑定律可知：

$$F=\frac{Qq}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\ (\mathrm{N})$$

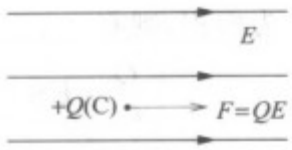


图 2.8 静电力作用下的点电荷

因为按定义 $E=F/q(\mathrm{V/m})$，故 P 点的电场强度 E 为：

$$E=\frac{\dfrac{Qq}{4\pi\varepsilon_0 r^2}}{q}=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\ (\mathrm{V/m})$$

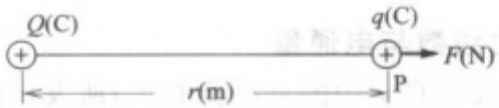


图 2.9 点电荷 Q 与 q

闭合曲面上的电场强度

如图 2.10 所示，将面积为 $S(\mathrm{m}^2)$ 的球面作为闭合曲面，设在此闭合曲面的中心有点电荷 $Q(\mathrm{C})$，则由此闭合曲面向外发出的**电力线数**为

电力线数

$$N=\frac{Q}{\varepsilon_0}\ (\text{根})$$

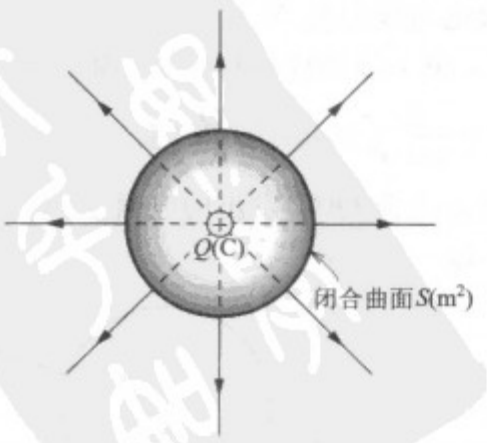


图 2.10 闭合曲面上的电力线数目

电力线密度

由于闭合曲面上的电力线与表面垂直，故可用**电力线密度**来考虑，即由曲面放出的电力线数为

N＝电力线密度×面积

因曲面上的电力线密度即曲面上的电场强度 E，故若令 S 为面积，则有

$$\frac{Q}{\varepsilon_0}=ES$$

也就是说，当事先知道电力线数时，或是知道了闭合曲面内的电荷及闭合曲面的面积，就能求出闭合曲面上的电场强度。

相关知识

◆ 电力线数与电通量

试求从放在真空中的点电荷 Q(C)所发出的电力线数 N。如图 2.11 所示，先求距点电荷 Q(C)为 r(m)的一点的电场强度 E 为：

$$E=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\ (\mathrm{V/m})$$

另一方面，该点的电场强度又定义为等于电力线密度，故此点的电力线密度为

$$\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\ (\text{根}/\mathrm{m}^2)$$

再如图 2.11 所示，令球的半径为 r(m)，则因电力线所通过的面积为 $4\pi r^2(\mathrm{m}^2)$，故电力线总数 N 为：

N＝电力线密度(根/m^2)×面积(m^2)

$$=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\times 4\pi r^2=\frac{Q}{\varepsilon_0}\ (\text{根})$$

此外，由点电荷 Q(C)发出的电通量 ϕ(C)为：

$$\phi=Q\quad(\mathrm{C})$$

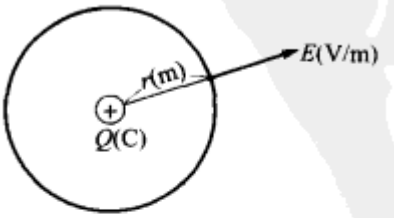


图 2.11　半径为 r 的球

例 题

[1] 在真空中某点 P 上放一电量为 3×10^{-6}C 的点电荷，其上受 5×10^{-4}N 的静电力。此 P 点的电场强度 P 是多少？

答 根据 $F=EQ$，故

$$E=\frac{F}{Q}\ (\mathrm{V/m})$$

将 $Q=3\times10^{-6}$C，$F=5\times10^{-4}$N 代入上式，则

$$E=\frac{5\times10^{-4}}{3\times10^{-6}}=1.67\times10^{2}\ (\mathrm{V/m})$$

[2] 试求距真空中放置的 5μC 的点电荷 6m 远处该点的电场强度。

答 $$E=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}=9\times10^{9}\times\frac{5\times10^{-6}}{6^2}=1.25\times10^{3}\ (\mathrm{V/m})$$

[3] 在相对介电常数 $\varepsilon_s=1000$ 的介质中有一个 3×10^{-6}C 的点电荷。试求此点电荷发出的电力线数 N。

答 一般介质中的电力线数 N 为：

$$N=\frac{Q}{\varepsilon}=\frac{Q}{\varepsilon_s\varepsilon_0}=\frac{3\times10^{-6}}{1000\times8.855\times10^{-12}}$$

$$=3.4\times10^{2}\ (\text{根})$$

[4] 如图 2.12 所示，在半径为 a(m)的圆筒上每 $1m^2$ 带有 ρ(C)的电荷，试求距圆筒 r(m)处一点的电场强度。

答 圆筒每单位长度的电荷 Q(C)为：

$$Q=2\pi al\rho=2\pi a\rho\ (\mathrm{C})$$

每单位长的圆筒表面积 S 为：

$$S=2\pi rl=2\pi r\ (\mathrm{m^2})$$

由此，再根据高斯定理可知

$$ES=\frac{Q}{\varepsilon}$$

$$E=\frac{Q}{\varepsilon S}=\frac{2\pi a\rho}{\varepsilon\cdot2\pi r}=\frac{a\rho}{\varepsilon r}\ (\mathrm{V/m})$$

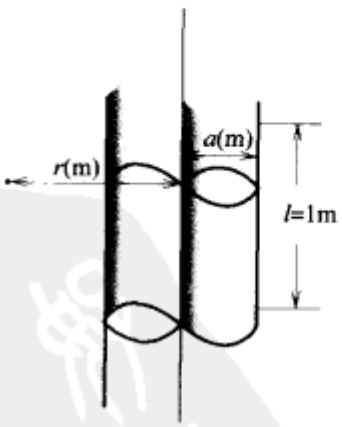


图 2.12 距圆筒 r(m)处一点的电场强度

3　电位与电位差

要　点

电位就是“单位正电荷所具有的电位能”，即“电场中某点的电位等于从无限远处把单位正电荷移动到该点所做的功(J/C)”。

另外，AB两点间的电位差，是指“把单位正电荷从B点移动到A点所做的功”。

解　释

电位的定义

由点电荷所产生的电场中的电位可表示如下(见图2.13)。

$$\text{在真空中：}V=\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}=9\times10^9\ \frac{Q}{r}\ (\text{V})$$

$$\text{在一般介质中：}V=\frac{Q}{4\pi\epsilon r}=9\times10^9\ \frac{Q}{\epsilon_s r}\ (\text{V})$$

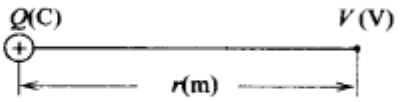


图2.13　距带电量为Q的点电荷r的一点的电位V

采用积分表示，电位的定义为(见图2.14)

$$V=-\int_{x=\infty}^{x=r}E_x\,\mathrm{d}x\quad(\text{V})$$

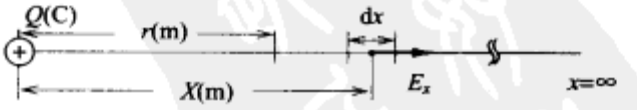


图2.14　以积分表示电位的定义

做　功

在电位的定义中有“做功”一说，其意义是当在力F作用下移动L(m)距离时，则用力F与距离L的乘积来表示，单位为焦[耳](J)。使**单位正电荷**运动所做的功还可表示为EL(J/C)，因为单位正电荷上所受的作用力就是该点的电场

单位正电荷

强度 E(N/C)，故当移动 L(m)距离时所做的功可以这样表示。

电位的单位按定义虽是 J/C，但实用则为伏[特]，符号为 V。电位是**标量**。

标量

由点电荷所决定的电场中的电位

如图 2.15 所示，在距 Q 任意距离 x 处取微小距离 $\mathrm{d}x$，则 $\mathrm{d}x$ 部分的电场强度为

$$E_x=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 x^2}\ (\mathrm{V/m})$$

在 $\mathrm{d}x$ 区间内，使单位正电荷朝与电场相反方向运动所做的功 $\mathrm{d}W$ 为：

$$\mathrm{d}W=-E_x\mathrm{d}x\ (\mathrm{J})$$

无限远处

因此，将单位正电荷从**无限远处**移动到 P 点所做的功 W 为：

$$W=-\int_{x=\infty}^{x=r}E_x\mathrm{d}x=-\int_{x=\infty}^{x=r}\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 x^2}\mathrm{d}x$$

$$=-\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(-\frac{1}{x}\right)_{x=\infty}^{x=r}=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}\ (\mathrm{J})$$

它表示 P 点的电位能，因此按定义，P 点的电位为

$$V=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}\ (\mathrm{V})$$

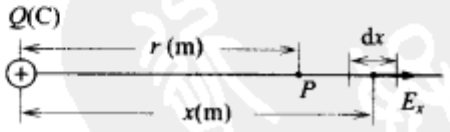


图 2.15 电位能

电位差的定义

两个不同点 A、B 之间的电位差，等于把单位正电荷从 B 点移动到 A 点所做的功(J/V)(见图 2.16)。设 A、B 点的电位分别为 V_A、V_B，则 V_A-V_B 就是 AB 间的电位差或电压。若 $V_A>V_B$，则 AB 间的电位差 V_{AB} 可表示为

$$V_{AB}=V_A-V_B\quad(\mathrm{V})$$

电位差 V_{AB} 若为正，就表明 A 点电位比 B 点电位高。

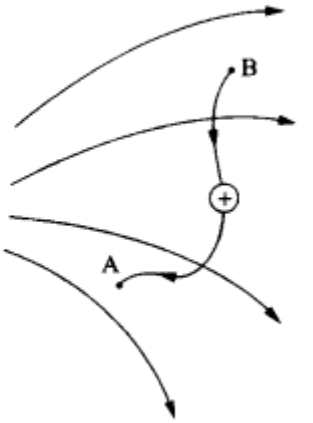


图 2.16　使单位正电荷运动

相关知识

◆ 用电位梯度表示电场强度

如图 2.17 所示，在面积 S 较大、间隔较小的两块平行的金属板上分别使其带 $+Q$(C)、$-Q$(C)的电荷，则在这两块平行的导体板之间，除端部以外，其电力线密度大致为一定值。因此，在平行的导体板之间各点的电场强度相等，为均匀电场。

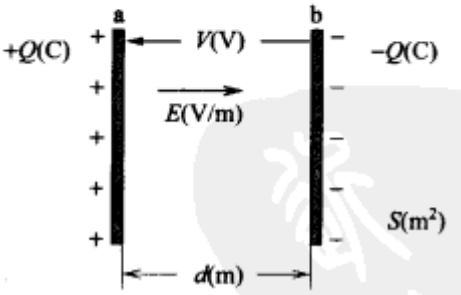


图 2.17　平行导体板

设此平行导体板的间隔为 d(m)，电场强度为 E(V/m)。在此电场中放入 +1C 的电荷，在平行导体板间任意点上均有等于 E(N)的作用力。这样，由于平行导体板间的电位差 V，等于把 +1C 的电荷从 b 移动到 a 所做的功，故有

$$V=E\times 1\times d=Ed \text{ (N)}$$

由此可知，电场强度可用下式表示为

$$E=\frac{V}{d} \text{ (V/m)}$$

例 题

[1] 试求在真空中距 $Q=6\times10^{-5}$C 的点电荷 7cm 的一点 P 的电位。

答 令 P 点的电位为 V(V),则

$$V=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}=9\times10^9\times\frac{6\times10^{-5}}{7\times10^{-2}}=7.7\times10^6\ (\text{V})$$

[2] 如将点电荷 $Q=3\times10^{-4}$C 在电场中由点 a 移至点 b 时做功为 3.5J,则 ab 间的电位差是多少伏?

答 因为电位差 V(V)等于使单位电荷运动所做的功,故

$$V=\frac{W}{Q}=\frac{3.5}{3\times10^{-4}}=11.7\ (\text{kV})$$

[3] 试求在真空中使半径为 30cm 的导体球带上 0.2μC 的电荷时,其表面的电场强度 E 和电位 V。

答 电场强度 E 为:

$$E=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 a^2}=9\times10^9\times\frac{0.2\times10^{-6}}{0.3^2}=2\times10^4\ (\text{V/m})$$

电位 V 为:

$$V=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 a}=9\times10^9\times\frac{0.2\times10^{-6}}{0.3}=6\times10^4\ (\text{V})$$

[4] 当使真空中放置的孤立导体球带上 6×10^{-5}C 电荷时,其电位为 30000V,试问此球的半径为多大?

答 根据 $V=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 a}=9\times10^9\times\frac{Q}{a}$,故

$$a=9\times10^9\times\frac{Q}{V}=9\times10^9\times\frac{6\times10^{-5}}{3\times10^4}=18\ (\text{m})$$

[5] 若在真空中放入 $Q=3\times10^{-5}$C 的点电荷,则距此点电荷 5cm 和 9cm 的两点间的电位差是多少?

答 设此二点的电位分别为 V_1、V_2,则有

$$V_1=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r_1}=9\times10^9\times\frac{3\times10^{-5}}{5\times10^{-2}}=5.4\times10^6\ (\text{V})$$

$$V_2=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r_2}=9\times10^9\times\frac{3\times10^{-5}}{9\times10^{-2}}=3\times10^6\ (\text{V})$$

所以 $V=V_1-V_2=2.4\times10^6$V

4 电　容

要　点

孤立导体的电容 C(F)等于此导体的电荷 Q(C)与此导体的(以无限远处为基准的)电位 V(V)之比(见图 2.18),即

$$C=\frac{Q}{V}\ (\mathrm{F})$$

其单位为 C/V,称作法[拉](F)。

两个导体间的电容 C 等于此二导体上所带异性等量的电荷 Q 与此二导体间的电位差 V 之比(见图 2.19):

$$C=\frac{Q}{V}\ (\mathrm{F})$$

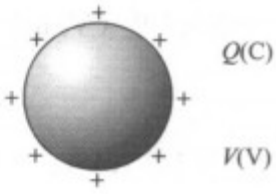


图 2.18　孤立导体

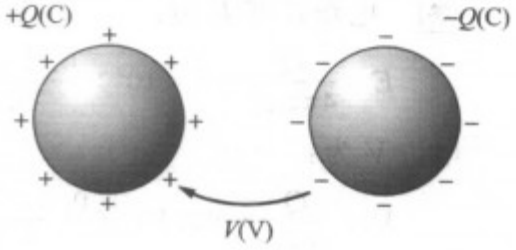


图 2.19　两个导体

解　释

孤立导体的电容

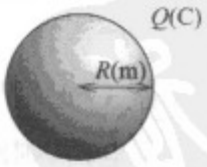


图 2.20　半径为 R 的导体球

半径为 R(m)的导体球放置在真空中,当使其带上 Q(C)电荷时,其电位 V_R 为(见图 2.20):

$$V_R=\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R}\ (\mathrm{V})$$

由此,根据电容的定义,此孤立导体的电容 C 为:

$$C=\frac{Q}{V_R}=4\pi\varepsilon_0 R\ (\mathrm{F})$$

平行板间的电容

试求如图 2.21 所示在极板面积为 $S(\mathrm{m}^2)$、间隔为 d(m)的两平行平板间放入介电常数为 ε 的电介质时的电容。当使极板 a 带 $+Q$(C)电荷、极板 b 带 $-Q$(C)电荷时,平板之间

为均匀电场。令此时的电场强度为 E，则根据高斯定理可知

$$ES=\frac{Q}{\varepsilon}$$

$$E=\frac{Q}{\varepsilon S}\ (\mathrm{V/m})$$

另一方面，ab 间的电压 V_{ab} 为：

$$V_{ab}=Ed=\frac{Qd}{\varepsilon S}\ (\mathrm{V})$$

因此，电容 C 为：

$$C=\frac{Q}{V_{ab}}=\frac{\varepsilon S}{d}\ (\mathrm{F})$$

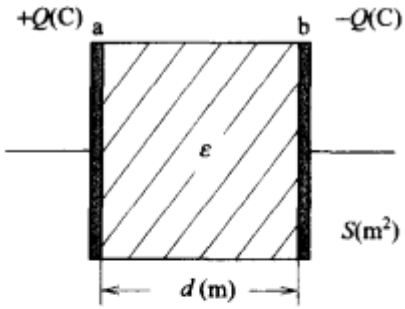


图 2.21 平行平板

相关知识

◆ 同轴圆筒间的电容

今使内圆筒的单位长度上带有 $+q$(C)电荷，在外圆筒的单位长度上带有 $-q$(C)电荷(见图 2.22)。由于可认为电场成放射状，故距中心 x(m)处圆筒内部的 P 点的电场强度，等于该点的电力线密度，而半径为 x(m)、长度为 l(m)的圆筒表面积为 $2\pi xl$，则由高斯定理可知

$$E_x S=\frac{q}{\varepsilon_0}$$

$$E_x\cdot 2\pi xl=\frac{q}{\varepsilon_0}$$

$$E_x=\frac{\frac{q}{\varepsilon_0}}{2\pi xl}$$

因此，ab 间的电位差 V_{ab} 为：

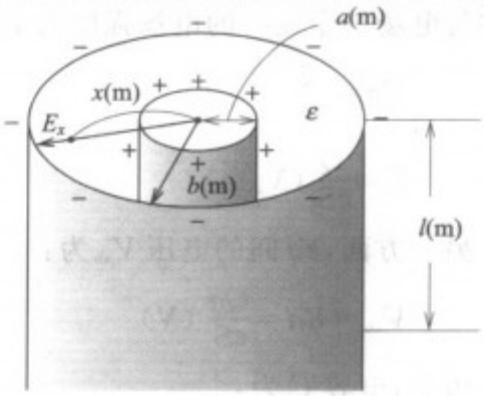


图 2.22　同轴圆筒间的电容

$$V_{ab}=-\int_a^b E_x\mathrm{d}x=\frac{q}{2\pi\varepsilon_0 l}\int_a^b\frac{1}{x}\mathrm{d}x=\frac{q}{2\pi\varepsilon_0 l}\log\frac{b}{a}$$

电容 C 可求得为：

$$C=\frac{q}{V_{ab}}=\frac{2\pi\varepsilon_0 l}{\log\dfrac{b}{a}}\ (\mathrm{F})$$

例　题

[1] 试计算将地球看作一个孤立的大导体球时的电容。设地球的半径 $R=6.38\times10^6\,\mathrm{m}$。

答　根据孤立导体球的电容公式可知

$$C=4\pi\varepsilon_0 R=4\pi\times8.855\times10^{-12}\times6.38\times10^6=710\times10^{-6}=710\ (\mu\mathrm{F})$$

[2] 面积 $100\mathrm{cm}^2$ 的两平板间隔为 1mm，平行放置，在其间插入相对介电常数为 5 的云母，试求此电容器的电容。

答　电容器的面积 S 为：

$$S=100\mathrm{cm}^2=100\times10^{-4}=1\times10^{-2}\ (\mathrm{m}^2)$$

而间隔 d 则为 $d=1\times10^{-3}\,\mathrm{m}$，故

$$C=\frac{\varepsilon_s\varepsilon_0 S}{d}=\frac{5\times8.855\times10^{-12}\times1\times10^{-2}}{1\times10^{-3}}$$
$$=440\ (\mathrm{pF})$$

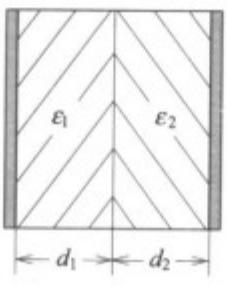


图 2.23　插入电介质的两块金属板

[3] 如图 2.23 所示，在面积为 $S(\mathrm{m}^2)$ 的两块金属板之间分别放入厚度为 d_1、d_2(m)，介电常数为 ε_1、ε_2(F/m) 的电介质，试求其电容。

答　设所求电容器的电容为 C，ε_1 部分的电容为 C_1，ε_2 部分的电容为 C_2，则有

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}$$

故 $C=\dfrac{C_1C_2}{C_1+C_2}$

式中，$C_1=\dfrac{\varepsilon_1 S}{d_1}$，$C_2=\dfrac{\varepsilon_2 S}{d_2}$

由此可知

$$C=\frac{\dfrac{\varepsilon_1 S}{d_1}\dfrac{\varepsilon_2 S}{d_2}}{\dfrac{\varepsilon_1 S}{d_1}+\dfrac{\varepsilon_2 S}{d_2}}=\frac{\varepsilon_1\varepsilon_2 S}{\varepsilon_1 d_2+\varepsilon_2 d_1}\ (\mathrm{F})$$

5　电容器的连接与合成电容

要　点

电容器串联时，其合成电容的倒数等于各电容器电容的倒数之和（见图 2.24），即

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\cdots+\frac{1}{C_n}\ (1/\mathrm{F})$$

电容器并联时，其合成电容等于各电容器电容之和（见图2.25），即

$$C=C_1+C_2+\cdots+C_n\ (\mathrm{F})$$

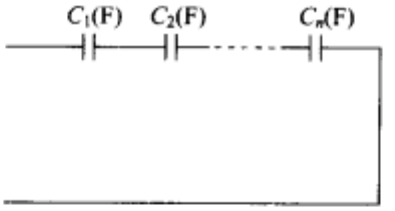


图 2.24　电容串联

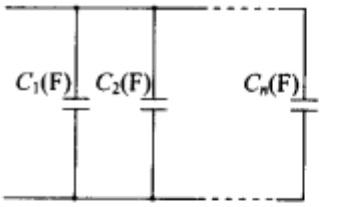


图 2.25　电容并联

解　释

电容器的串联

把电容为 C_1、C_2、C_3 的三个电容器像图 2.26 所示那样连接起来，在 ab 之间加上电压 V(V)，就有电荷 Q(C)储存于其间。这时在 a 端充有 $+Q$(C)，在 b 端充有 $-Q$(C)的电荷。至于 ab 中间的电极上则并非由外部运来、而是靠静电感应分别产生 $+Q$(C) 和 $-Q$(C)的电荷。因此，即使各电容器的电容不同，所具有的电荷是相同的。令各电容器上的电压分别为 V_1、V_2、V_3，则有

$$V_1=\frac{Q}{C_1},\quad V_2=\frac{Q}{C_2},\quad V_3=\frac{Q}{C_3}$$

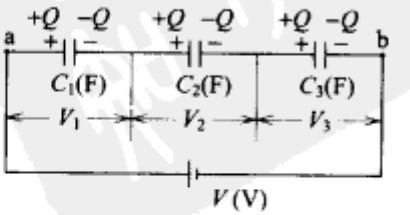


图 2.26　串联后施加电压

由于 ab 之间的电压 V 为：

$$V=V_1+V_2+V_3=Q\left(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}\right)$$

故 ab 之间的电容，即合成电容 C 为：

$$C=\frac{Q}{V}=\frac{Q}{Q\left(\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}\right)}=\frac{1}{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}}\ (\mathrm{F})$$

以倒数表示，则可写为

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3}\ (\mathrm{F})$$

电容器的并联

把电容为 C_1、C_2、C_3 的三个电容器如图 2.27 所示连接，并在 ab 之间加上电压 V(V)，则在各电容器的电极间均有相同的电压 V(V)。故在各电容器上分别充有 $Q_1=C_1V$、$Q_2=C_2V$、$Q_3=C_3V$ 的电荷。由于 ab 间的电荷为各电容器电荷之和，并令其为 Q，则有

$$Q=Q_1+Q_2+Q_3=C_1V+C_2V+C_3V=V(C_1+C_2+C_3)$$

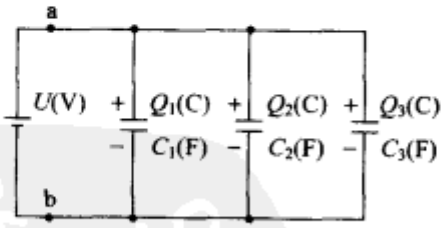


图 2.27　并联后施加电压

由此，若令 C_1、C_2、C_3 并联的 ab 两端合成电容为 C，则有

$$C=\frac{Q}{V}=\frac{V(C_1+C_2+C_3)}{V}=C_1+C_2+C_3\ (\mathrm{F})$$

相关知识

◆ 串联的电容及电压分配

如图 2.28 所示，将电容为 C_1、C_2、C_3 的三个电容器串联，当在其两端施加电压 V(V)时，计算各电容器的电压 V_1、V_2、V_3。

设各电容器上所带电荷为 Q(C)，其合成电容为 C，则有

$$V_1=\frac{Q}{C_1}=\frac{C}{C_1}V \quad (\mathrm{V})$$

$$V_2=\frac{Q}{C_2}=\frac{C}{C_2}V \quad (\mathrm{V})$$

$$V_3=\frac{Q}{C_3}=\frac{C}{C_3}V \quad (\mathrm{V})$$

其电压比为

$$V_1 : V_2 : V_3=\frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2} : \frac{1}{C_3}$$

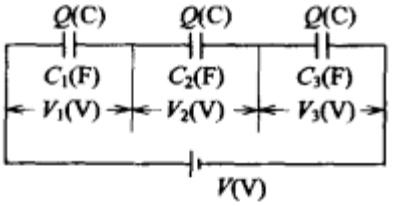


图 2.28　电压分配

例　题

[1] 如图 2.29 所示，将五个电容器连接起来，试求 ab 之间的合成电容。

答　合成电容 C 为：

$$C=\frac{1}{\frac{1}{4}+\frac{1}{5}+\frac{1}{1+2+3}}=1.62 \quad (\mu\mathrm{F})$$

[2] 试求如图 2.30 所示电路中 C_2 的电容。设 C_1、C_3 的电容分别是 20μF、5μF，其两端的电压分别为 150V、200V。

答　令 C_2 与 C_3 的合成电容为 X，C_2 的电容为 x，则据题意有

$$200\mathrm{V}=\frac{1}{X(\mu\mathrm{F})}\times\frac{20\mu\mathrm{F}\times X(\mu\mathrm{F})}{20\mu\mathrm{F}+X(\mu\mathrm{F})}\times 350\mathrm{V},\ X=15\mu\mathrm{F}$$

$$C_2+C_3=x+5=15\mu\mathrm{F},\ x=10\mu\mathrm{F}$$

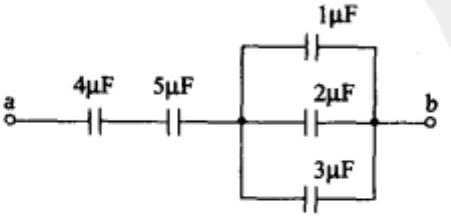


图 2.29　五个电容器连接

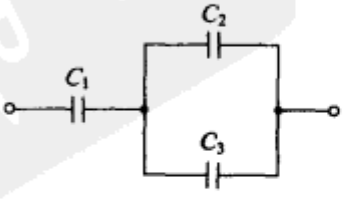


图 2.30　计算 C_2 的电容

6　电容器中储存的电能

要　点

若电容为 C 的电容器上有端电压 V，则此电容器上储存有

$$W=\frac{1}{2}CV^2 \text{ (J)}$$

的电能。

解　释

移动电荷必须做的功

当使电容为 C(F)的电容器上带有电荷 q(C)时(见图 2.31)，令其电位为 v(V)，则有

$$v=\frac{q}{C}$$

进而若再使 $\mathrm{d}q$(C)电荷移动，则必须做功为 $\mathrm{d}w$(J)，可表示为(见图 2.32)

$$\mathrm{d}w=v\mathrm{d}q=\frac{q}{C}\mathrm{d}q \text{ (C)}$$

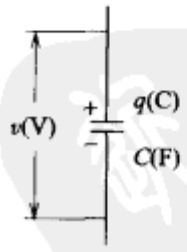


图 2.31　电位 v

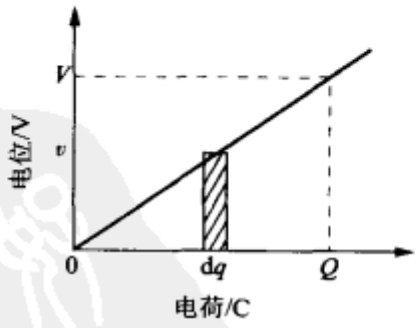


图 2.32　电荷 $\mathrm{d}q$

由此可知，最终移动电荷 Q(C)所必须做的功 W 为：

$$W=\int_{q=0}^{q=Q}\mathrm{d}w=\int_{q=0}^{q=Q}v\mathrm{d}q$$

$$=\int_{q=0}^{q=Q}\frac{q}{C}\mathrm{d}q=\frac{Q^2}{2C}=\frac{1}{2}QV$$

$$=\frac{1}{2}CV^2 \quad \text{(J)}$$

相关知识

◆ 静电能与电场

因为在图 2.33 所示平行板电容器的场合具有

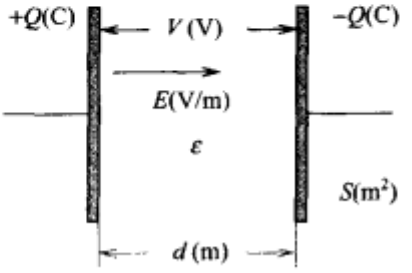


图 2.33　平行板电容器

$$C=\frac{\varepsilon S}{d},\quad V=Ed$$

故其静电能 W 为：

$$W=\frac{1}{2}QV=\frac{1}{2}CV^2=\frac{1}{2}\frac{\varepsilon S}{d}V^2$$

$$=\frac{1}{2}\frac{\varepsilon S}{d}(Ed)^2=\frac{1}{2}\varepsilon E^2 Sd$$

将 $D=\varepsilon E$ 代入，则可表示为

$$W=\frac{1}{2}DESd\ (\mathrm{J})$$

式中，Sd 表示平行板电容器的体积，因此在电场的单位体积中储存的静电能密度 w 为：

$$w=\frac{W}{Sd}=\frac{1}{2}\varepsilon E^2\ (\mathrm{J/m^3})$$

例　题

[1] 当给电容为 $20\mu\mathrm{F}$ 的电容器加上 500V 的电压时，试求此电容器上所储存的电荷与静电能。

答　储存的电荷 Q(C) 为：

$$Q=CV=20\times10^{-6}\times500=1\times10^{-2}\ (\mathrm{C})$$

电能 W(J) 为：

$$W=\frac{1}{2}CV^2=\frac{1}{2}\times20\times10^{-6}\times(5\times10^2)^2=2.5\ (\mathrm{J})$$

[2] 设在真空中面积为 $30\mathrm{cm}^2$、间隔为 6mm 的平行板电容器加上 1200V 电压，试求其所储存的能量。

答　储存的能量 W 为：

$$W=\frac{\varepsilon S}{2d}V^2=\frac{1}{2}\times8.855\times10^{-12}\times\frac{30\times10^{-4}}{6\times10^{-3}}\times(1200)^2$$

$$=3.19\times10^{-6}\ (\mathrm{J})$$

7 磁 荷

要 点

若真空中放置的点磁荷的强度分别为 m_1(Wb)、m_2(Wb)，如图 2.34 所示，点磁荷间的距离为 r(m)，则二点磁荷相互间的作用力 F(N)为：

$$F=k\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

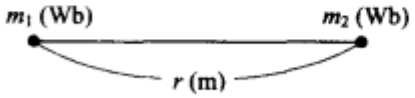


图 2.34 点磁荷(设想)

在真空中 $k=\dfrac{1}{4\pi\mu_0}$，故

$$F=\frac{1}{4\pi\mu_0}\cdot\frac{m_1 m_2}{r^2}\ (\mathrm{N})$$

式中，μ_0 称为真空中的磁导率。

$$\mu_0=4\pi\times10^{-7}\ (\mathrm{H/m})$$

因此有

$$k=\frac{1}{4\pi\mu_0}=6.33\times10^4$$

解 释

磁荷

磁偶极子

永久磁铁

磁极

在静电的情况下，可以取出单独的正电荷与负电荷来考虑；而在磁的情况下，就不存在与电荷相对应的单独的正或负的**磁荷**，它一定是以磁的偶极子形式存在的。

作为**磁偶极子**的永久磁铁是存在的，此**永久磁铁**的**磁极**间有相互作用力，如图 2.35 所示，即在磁荷(m_1，m_2)之间的作用力，如上式所示。

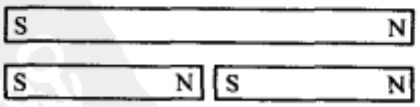


图 2.35 N 极与 S 极不能分离

例 题

[1] 当在真空中以间隔为 15cm 的距离放置 4×10^{-5} Wb 的 N 极与 5×10^{-3} Wb的 N 极时，试求该磁极间的作用力。

答 $F=6.33\times10^4\times\dfrac{4\times10^{-5}\times5\times10^{-3}}{0.15^2}=0.56\ (\mathrm{N})$

8　磁　场

要　点

距离磁荷 m(Wb)为 r(m)远的一点，如图 2.36 所示，其磁场强度 H(A/m)为：

$$H=\frac{1}{4\pi\mu_0}\cdot\frac{m}{r^2}\quad(\mathrm{A/m})$$

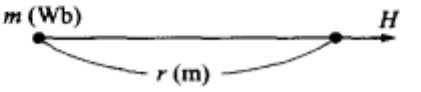


图 2.36　磁场强度

解　释

磁场强度

当在磁场强度为 H(A/m)的磁场中放入 m(Wb)的磁极时，如图 2.37 所示，其上受到的作用力 F(N)为：

$$F=mH\quad(\mathrm{N})$$

由此可知

$$H=\frac{F}{m}\quad(\mathrm{A/m})\qquad(2.1)$$

磁场　有磁力作用的空间，称为**磁场**。**磁场强度** H 的定义如下：

磁场强度　“当在磁场中放入正磁极时，把磁极上受到的作用力 F(N)换算成每+1Wb 的力的当量，就称其为磁场强度。”

这里应加以说明的是，本来+m(Wb)的单独磁极是不存在的，在这里是以作为磁铁性质的磁极上所受**磁力**大小来加以考虑的。

磁力

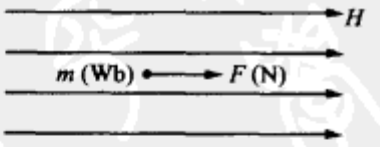


图 2.37　磁场中一点的受力

磁力线

如果在一张纸上撒上铁粉，纸下放一块磁铁，则铁粉就会在纸上形成从 N 极出发到 S 极为止的若干条曲线状的分布，将此称为**磁力线**。在真空中从 m(Wb)的磁极发出的磁

磁力线

力线数目 N 的定义为：

$$N=\frac{m}{\mu_0}\text{（根）} \tag{2.2}$$

磁通与磁感应强度

磁通

磁力线的数目虽然是随磁导率 μ 而变化的，但在分析时若能从 m(Wb)发出 m(根)线束进行考虑则较为方便，因此将这样考虑的线称为**磁通**。可以认为，它是在与磁力线的关系中单独使用的不同的量，其单位用韦[伯](Wb)表示。由于从m(Wb)发出 m(根)线的磁通，故磁通 Φ(Wb)由式(2.2)可知

$$m=\mu_0 N$$

因此有

$$\Phi=m=\mu_0 N \tag{2.3}$$

两边用截面积 S 除，则有

$$\frac{\Phi}{S}=\mu_0\frac{N}{S} \tag{2.4}$$

磁力线密度

N/S 为**磁力线密度**，它等于磁场强度。

将 $\Phi/S=B$ 代入式(2.4)，则式(2.4)变为

$$B=\mu_0 H \tag{2.5}$$

磁感应强度
特[斯拉]

将这时的 B 称为**磁感应强度**，其单位为(Wb/m²)，用**特[斯拉]**(T)表示。

磁导率

磁性
磁化
磁性体

将某一物体放入磁场中，就会带上**磁性**，将这种现象称为**磁化**，把能够产生磁化作用的物质称为**磁性体**。即使在相同的磁场强度下，被磁化的强度也因物质而异，有具有强磁性的物质，也有具有弱磁性的物质。这样，磁性体可按磁化的强弱，分成**强磁性体**和**弱磁性体**。

强磁性体
弱磁性体

此外，根据被磁化的磁极方向与外加磁场方向的异同，还可分为**顺磁性物质**和**抗磁性物质**。

顺磁性物质
抗磁性物质
磁化强度

磁化强度的单位与磁感应强度相同，为 Wb/m²。**磁化强度** J 与磁场强度 H 之间的关系为

$$J=\chi_m\mu_0 H \tag{2.6}$$

磁化率

式中，χ_m 称为**磁化率**，它是无量纲的常数，对顺磁性体为正，对抗磁性体为负。

若磁性体内的磁场强度为 H，被磁化达到的磁化强度为 J，这时的磁感应强度 B 为：

$$B=\mu_0 H+J \tag{2.7}$$

将式(2.6)代入式(2.7)，则有

$$B=\mu_0 H+\chi_m\mu_0 H=(1+\chi_m)\mu_0 H \tag{2.8}$$

这里若令

$$\mu_0=1+\chi_m,\quad \mu=\mu_s\mu_0$$

则式(2.8)可写为

$$B=\mu H$$

相对磁导率　**真空的磁导率**

式中，μ 为磁导率，单位是 H/m。而 μ_s 则被称为**相对磁导率**，它是磁性体的磁导率 μ 与**真空的磁导率** μ_0 之比。

磁滞

式(2.6)仅适用于弱磁性体，对于强磁性体，一般磁化强度 J 与磁场强度不成正比，而是具有**磁滞**的关系。

例　题

[1] 试求在真空中距离 3×10^{-5} Wb 的磁极 30cm 远的一点的磁场强度。

答　$$H=\frac{1}{4\pi\mu_0}\cdot\frac{m}{r^2}$$

$$=6.33\times10^4\times\frac{3\times10^{-5}}{(0.3)^2}=21.1\ (\mathrm{A/m})$$

[2] 在空气中将 4×10^{-5} Wb 的 N 极与 5×10^{-3} Wb 的 N 极以相距 15cm 的距离放置，求磁极间的作用力。

答　$$F=6.33\times10^4\times\frac{m_1m_2}{r^2}$$

$$=6.33\times10^4\times\frac{4\times10^{-5}\times5\times10^{-3}}{(0.15)^2}$$

$$=0.56\ (\mathrm{N})$$

9 安培定律

要点

安培右螺旋法则

当旋转右螺旋时，若以右螺旋前进的方向表示电流的方向，则右螺旋的旋转方向就与磁场方向一致。如图 2.38 所示。

安培定律

在磁场中，当考虑任意的闭合曲面时，沿着这个闭合曲面所取的磁场强度与微小长度的乘积之和，就等于此闭合曲面内所含有的全部电流。例如对图 2.39 有

$$H_1\Delta l_1+H_2\Delta l_2+\cdots+H_n\Delta l_n=I_2-I_1-I_3$$

若以积分表示则有

$$\oint H\cdot \mathrm{d}l=I_2-I_1-I_3$$

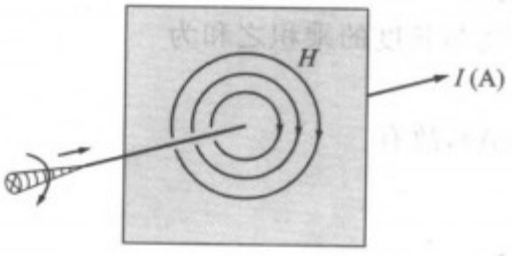


图 2.38 右螺旋法则

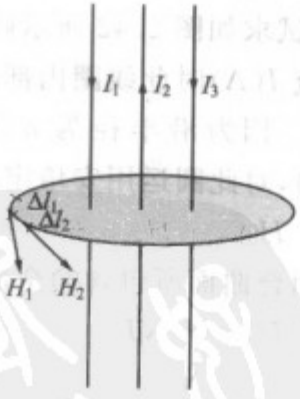


图 2.39 安培定律示例

解释

由电流所产生的磁通的方向可依据右螺旋法则确定，如图 2.40 所示。

当在无限长的导线上有电流 I(A)流动时，在离此导线 r(m)距离的一点上所产生的磁场强度 H，可用图 2.41 所示的包含 P 点在内的半径为 r(m)的闭合曲线来考虑，在此曲线上任一点的磁场强度 H 是一定的。

由此可知，沿这条曲线运用安培定律，就有

$$H\Delta l_1 + H\Delta l_2 + \cdots = I$$

$$H(\Delta l_1 + \Delta l_2 + \cdots) = I$$

$$H(2\pi r) = I$$

$$H = \frac{I}{2\pi r}\ (\mathrm{A/m})$$

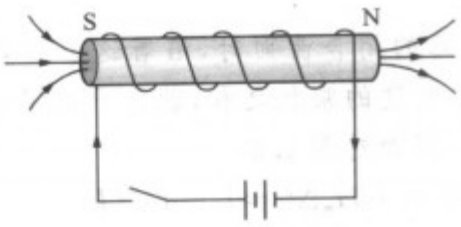


图 2.40　电流产生磁通的方向

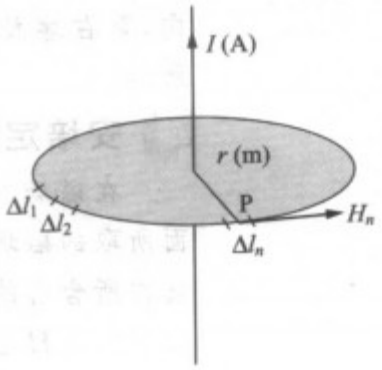


图 2.41　闭合曲线的磁场强度

例　题

[1] 试求如图 2.42 所示匝数为 N、平均半径为 a(m)的环状螺线管线圈中流有电流 I(A)时此线圈内部的磁场强度 H。

答　因为沿半径为 a(m)的圆上的任一点磁场强度都相等，令其为 H(A/m)，对此圆运用安培定律，则可得磁场与长度的乘积之和为

$$H\Delta l_1 + H\Delta l_2 + \cdots = H2\pi a$$

由于此闭合曲面所包含的全部电流为 NI(A)，故有

$$H2\pi a = NI$$

$$H = \frac{NI}{2\pi a}\ (\mathrm{A/m})$$

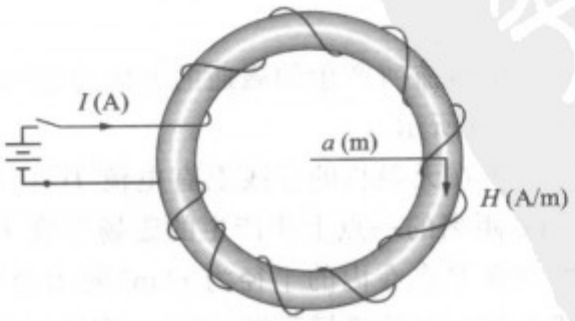


图 2.42　求环状螺管线圈内的磁场强度

10 毕奥-萨伐尔定律

要 点

在一条直导线上取一微小长度 Δl(m)，导线中通以电流 I(A)，如图 2.43 所示，则在与此导线成 θ(rad)角、距 Δl 为 r(m)距离的 P 点所产生的磁场强度 ΔH(A/m)可用下式表示：

$$\Delta H=\frac{I\Delta l\sin\theta}{4\pi r^2} \quad (\mathrm{A/m})$$

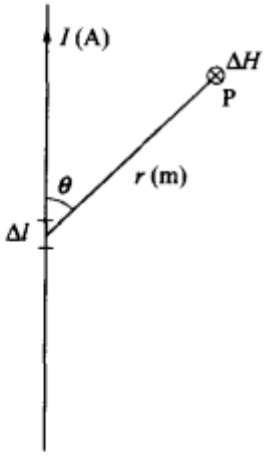


图 2.43 毕奥-萨伐尔定律

例 题

[1] 设流有电流为 I(A)的圆形导线半径为 a(m)，求此圆形导线中心 O 点的磁场强度 H(H/m)。

答 由于是圆形的流有电流的导线，故由微小区间 Δl_1 所产生在中心 O 点的电流磁场强度为

$$\Delta H_1=\frac{I\Delta l_1\sin 90^\circ}{4\pi a^2}$$

由 Δl_1、Δl_2、Δl_3、…所产生的磁场也可同理求得

$$\Delta H_2=\frac{I\Delta l_2}{4\pi a^2}$$

$$\Delta H_3=\frac{I\Delta l_3}{4\pi a^2}$$

…

据此，中心点的磁场强度 H 为：

$$\begin{aligned} H &= \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \cdots \\ &= \frac{I}{4\pi a^2}(\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 + \cdots) \\ &= \frac{I}{4\pi a^2} \times 2\pi a \\ &= \frac{I}{2a}\ (\mathrm{A/m}) \end{aligned}$$

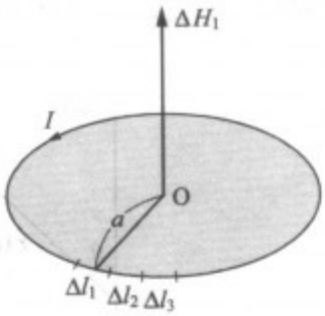


图 2.44　例题 1 图

[2] 试求距流有电流 I(A)的半径为 a(m)的圆形导线的圆心为 x(m)距离上一点 P 的磁场强度。

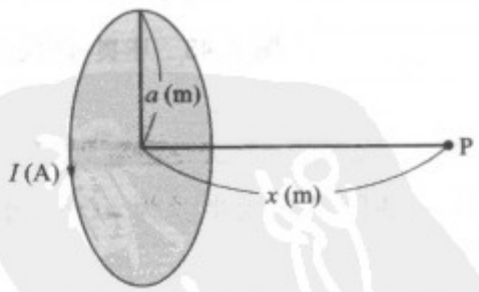


图 2.45　例题 2 图

答　(1) 由 Δl_1 部分所产生的 P 点的磁场强度 ΔH_1 为：

$$\Delta H_1 = \frac{I\Delta l_1}{4\pi r^2}$$

如图 2.46 所示。

(2) 将 ΔH_1 分解为轴向分量 ΔH_{1x} 与垂直轴向的分量 ΔH_{1y}，同理求 ΔH_2、ΔH_3、…，并分别将它们分解成轴向分量和垂直轴向的分量，可以看出垂直轴向的分量之和为 0。

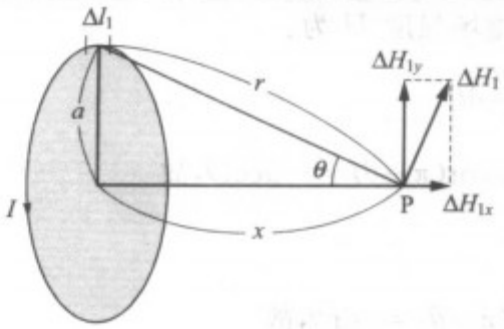


图 2.46 Δl_1 部分在 P 点所产生的磁场强度

(3) P 点的磁场强度等于其轴向分量之和，即

$$\Delta H_{1x}=\Delta H_1\sin\theta$$

$$\Delta H_{2x}=\Delta H_2\sin\theta$$

$$\Delta H_{3x}=\Delta H_3\sin\theta$$

令 P 点的磁场强度为 H，则有

$$H=\Delta H_{1x}+\Delta H_{2x}+\Delta H_{3x}+\cdots$$

$$=\frac{I\sin\theta}{4\pi r^2}(\Delta l_1+\Delta l_2+\Delta l_3+\cdots)$$

在这里，因 $\sin\theta=\dfrac{a}{r}$，$\Delta l_1+\Delta l_2+\Delta l_3+\cdots=2\pi r$，故有

$$H=\frac{I}{4\pi r^2}\times\frac{a}{r}\times 2\pi a$$

$$=\frac{Ia^2}{2r^3}=\frac{Ia^2}{2(a^2+x^2)^{3/2}}\ (\mathrm{A/m})$$

3 如图 2.47 所示试求距有限长导线为 a(m)距离的一点 P 的磁场强度。

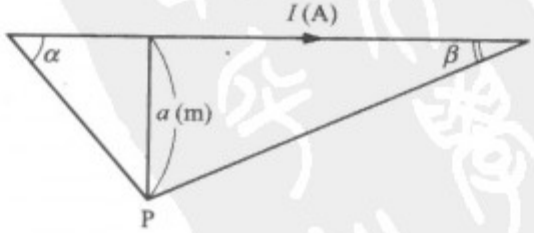


图 2.47 例题 3 图

答 (1) 如图 2.48 所示，依据毕奥-萨伐尔定律，由 dl 部分所产生的在 P 点的磁场强度 dH 为：

$$\mathrm{d}H=\frac{I\mathrm{d}l\sin\theta}{4\pi r^2}$$

由此可知 P 点的磁场强度 H 为：

$$H=\int\frac{I\sin\theta}{4\pi r^2}\mathrm{d}l \tag{1}$$

(2) 在这里因 $l=a\cot(\pi-\theta)=-a\cot\theta$，故

$$\mathrm{d}l=\frac{a}{\sin^2\theta}\mathrm{d}l \tag{2}$$

(3) 再有 $a=r\sin(\pi-\theta)=r\sin\theta$，故

$$r=\frac{a}{\sin\theta} \tag{3}$$

(4) 将式(2)、式(3)、代入式(1)，整理可得

$$H=\frac{I}{4\pi a}\int_0^{\pi-\beta}\sin\theta\mathrm{d}\theta$$

$$=\frac{I}{4\pi a}[-\cos\theta]_0^{\pi-\beta}$$

$$=\frac{I}{4\pi a}(\cos\alpha+\cos\beta)\quad(\mathrm{A/m})$$

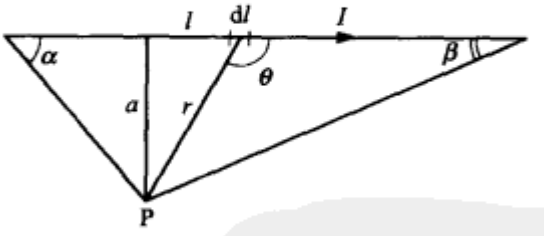


图 2.48　$\mathrm{d}l$ 部分在 P 点所产生的磁场强度

11 电磁力

要点

将流有电流的导线接近一块磁铁，此导线就会受到力的作用而朝某一方向运动。这个力就是电磁力，其方向由电流和磁场的方向决定。这种关系可由弗莱明左手定则来确定。电磁力、电流与磁场的关系用矢量符号可表示为

$$\boldsymbol{F}=(\boldsymbol{I}\times\boldsymbol{B})\boldsymbol{l}$$

解释

电磁力

弗莱明左手定则

弗莱明左手定则

将左手伸出，使拇指、食指与中指互成直角，令食指指向磁场方向、中指指向电流方向，则拇指所指就是**电磁力**的方向。上述关系称为**弗莱明左手定则**，如图 2.49 和图 2.50 所示。



图 2.49 弗莱明左手定则

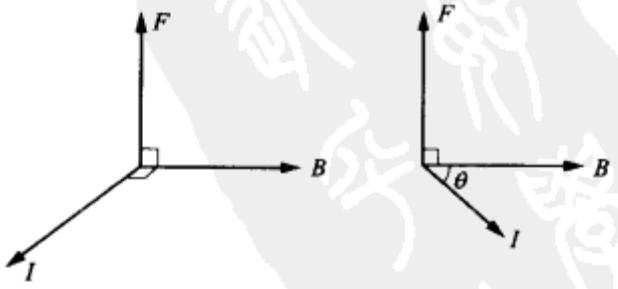


图 2.50 弗莱明左手定则的方向关系

弗莱明左手定则可将 θ 不为 90°时的 F、I、B 之间的关系表示为(见图 2.51)

$$F=IBl\sin\theta$$

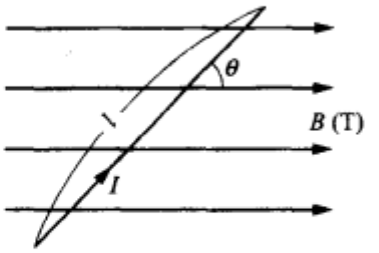


图 2.51　夹角为 θ 时的情形

两根平行载流导线间的作用力

如图 2.52 所示，现在就来求当分别流有 I_1、I_2(A)电流的两根平行导线相距 r(m)时，其每 1m 长度上所受电磁力的大小。

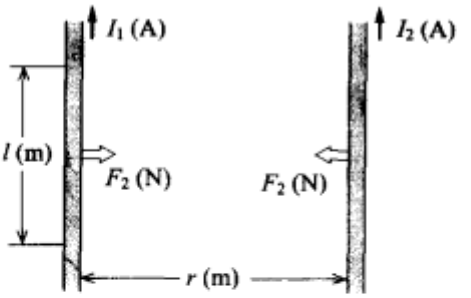


图 2.52　两根平行导线间的作用力

由 I_1 导线作用，在 I_2 导线上所产生的磁场强度 H_1(A/m)为：

$$H_1 = \frac{I_1}{2\pi r} \text{ (A/m)}$$

因此，I_2 上每 1m 长度所受电磁力 F_1 为：

$$\begin{aligned} F_1 &= I_2 B_1 \\ &= I_2 \mu_0 H_1 \\ &= I_2 \mu_0 \frac{I_1}{2\pi r} \text{ (N/m)} \end{aligned}$$

因为

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$$

故有

$$F_1 = \frac{2 I_1 I_2}{r} \times 10^{-7} \text{ (N/m)}$$

霍尔效应与洛伦兹力

因为电流是由单位时间内移动的电荷所决定，故所谓磁场中的电流受电磁力作用，即磁场中运动的电荷受到力的作用。

导体的长度 l、电流 I、磁感应强度 B、电磁力 F 之间的关系为

$$F=IBl$$

洛伦兹力

这种力称为**洛伦兹力**。电流 I、电荷 q、时间 t 之间的关系为：

$$I=\frac{q}{t}$$

因此有

$$F=\frac{q}{t}Bl$$

这时，电荷的运动方向与磁场方向成直角关系。若导体的电荷运动速度为 v(m/s)，则有

$$v=\frac{l}{t}$$

故

$$F=qvB$$

下面来看在磁场中运动的 1 个电子的情形，设电子所携带的电荷为 e(C)，则在电子上所受的作用力为

$$F=evB \quad (\mathrm{N})$$

图 2.53 表示导体中的电子被压向底部而使电子分布不均匀，上面的电子不充足的现象。由此，在导体内部产生由上而下方向的电场，因此若在导体的上部和下部放置电极，其间就会有电压。这种现象称为**霍尔效应**，此电压称为**霍尔电动势**。这时，若采用半导体作为试件，则依据所测霍尔电

霍尔效应

霍尔电动势

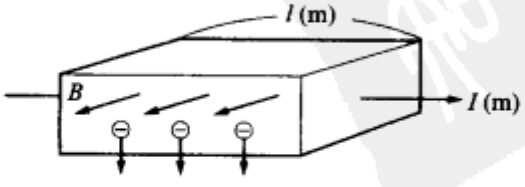


图 2.53 电子被压向底部

动势的方向，就可以判别半导体内的多数载流子是电子还是空穴，即可以判别试件为N型半导体还是P型半导体。

例　题

1 将长45cm的导线成30°角放置于磁感应强度为0.4T的均匀磁场中，当在导线中通以10A电流时作用在导线上的电磁力是多少？

答　$F=IBl\sin\theta=10\times0.4\times0.45\times\sin30^\circ=0.9$（N）

12　电磁感应

要　点

由电磁感应所产生的感应电动势 e 为：

$$e=-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\ (\mathrm{V})$$

对于 N 匝的线圈则有

$$e=-\frac{N\Delta\Phi}{\Delta t}\ (\mathrm{V})$$

将 $N\Delta\Phi$ 称为磁链。

解　释

法拉第定律

如图 2.54 所示，将线圈与检流计相连，再把一块磁铁一会儿靠近线圈、一会儿远离线圈，检流计的指针就会左右摆动，这表示线圈中有电流流动，可以归纳为以下几种情况：

① 磁铁靠近或远离线圈，检流计指针摆动的方向相反。

② 磁铁缓慢靠近或快速靠近，检流计摆动的幅度不同，快速靠近越甚摆动越大。

③ 即便是强的磁铁在静止时，检流计也不会摆动。

④ 若磁铁静止不动，而使线圈运动，也会产生上述①～③的现象。

电磁感应

这种现象称为**电磁感应**，可用法拉第定律来表述。

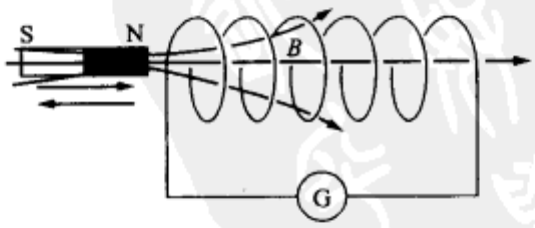


图 2.54　法拉第定律

法拉第定律用语言来表达就是：“由于电磁感应在回路中感生的电动势，与链环中此回路的磁通减少的变化率成正比”。

将此用公式表示则为

$$e=-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

楞次定律

楞次定律

在 $e=-\Delta\Phi/\Delta t$ 的式子中，右边之所以取负号，是因为要表示当链环的磁通减少时，所产生的电动势的方向与最初流动的电流方向相同，有关这种方向的规律称为**楞次定律**。楞次定律用语言来表达就是："由于电磁感应而在回路中所产生的电动势，其方向为反抗与此回路链环的磁通的变化。"

弗莱明右手定则

它是表示导体在磁场中运动时，所产生的感应电动势的方向的法则，即以右手中的拇指指向为运动方向，食指指向为磁场方向，则中指指向就是感应电动势的方向，如图 2.55 所示。



图 2.55　弗莱明右手定则

例　题

[1] 如图 2.56 所示，在匝数为 500 匝的螺管线圈中有 0.04Wb 的磁通通过。若在 0.02s 内使此磁通为 0，则在线圈中产生多少伏感应电动势？

答

$$e=-N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

$$=-500\times\frac{(0-0.04)}{0.02}$$

$$=1000\ (\mathrm{V})$$

[2] 当与螺管线圈垂直的磁场以 1s 内有 200A/m 的变化率变化时，在线圈中产生的感应电动势是多少（见图 2.57）？已知线圈的半径为 25cm，匝数为 20。

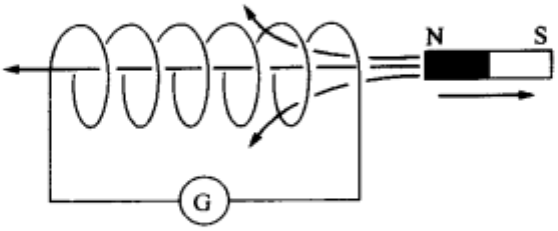


图 2.56 例题 1 图

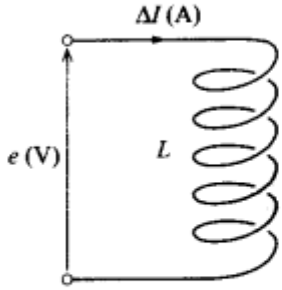


图 2.57 例题 2 图

答 $B=\mu_0 H=4\pi\times10^{-7}\times H=4\pi\times10^{-7}\times200=8\pi\times10^{-5}$ (T)

因此，磁通 Φ 的变化为

$$\begin{aligned}\Delta\Phi &= BS\\ &=8\pi\times10^{-5}\times\pi\times(0.25)^2\\ &=4.93\times10^{-5}\ (\text{Wb})\end{aligned}$$

由此可知，

$$|e|=\frac{N\Delta\Phi}{\Delta t}=\frac{2\times4.93\times10^{-5}}{1}=9.86\times10^{-5}\ (\text{V})$$

[3] 有一架主翼长为 45m 的飞机以时速 800km 飞行。当地球磁场强度的垂直分量为 27.8A/m 时，在飞机主翼上感生的电动势有多大？

答 $e=Blv=\mu_0 H\times l\times v$

$$\begin{aligned}&=4\pi\times10^{-7}\times27.8\times45\times\frac{800\times10^3}{60\times60}\\ &=0.35\ (\text{V})\end{aligned}$$

13　电　感

要　点

(1) 当在自感为 L(H)的线圈中流动的电流在 Δt 内增加 ΔI(A)时，线圈中所产生的感应电动势 e(V)为：

$$e=-L\frac{\Delta I}{\Delta t}\ (\mathrm{V})$$

(2) 设有一次线圈 P 与二次线圈 Q 以电磁耦合。如图 2.58 所示，当线圈 P 中的电流在 Δt 内增加 ΔI(A)时，在线圈 Q 两端产生的感应电动势 e(V)为：

$$e=-M\frac{\Delta I}{\Delta t}\ (\mathrm{V})$$

式中，M(H)被称为互感。

(3) 具有电磁耦合的两线圈之间(见图 2.59)存在如下关系：

$$M=k\sqrt{L_1L_2}\ (\mathrm{H})$$

式中，L_1、L_2 为自感；M 为互感；k 为耦合系数，$0\leqslant k\leqslant 1$。

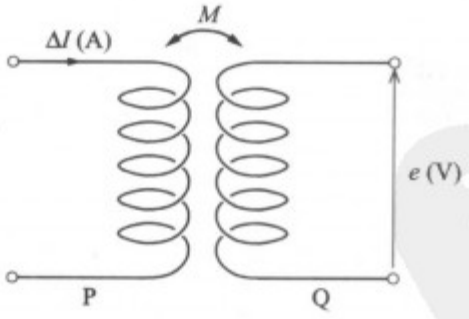


图 2.58　电磁耦合

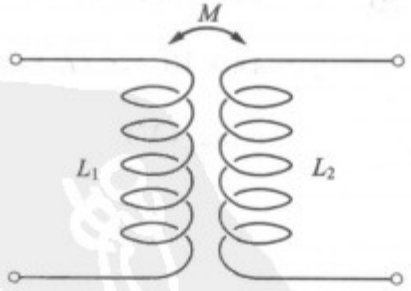


图 2.59　具有电磁耦合的两线圈

(4) 当将具有自感 L_1、L_2(H)和互感 M(H)的两线圈串联时，如图 2.60 那样的合成电感 L 为：

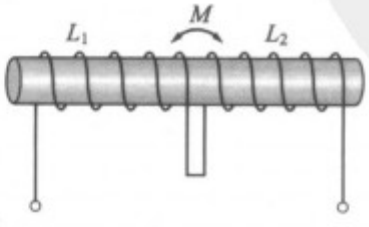


图 2.60　两线圈串联(正串)

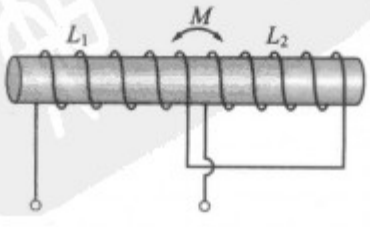


图 2.61　两线圈串联(反串)

$$L=L_1+L_2+2M$$

图 2.61 那样的合成电感为：

$$L=L_1+L_2-2M$$

解 释

线圈中有电流流动，就产生磁通 Φ(Wb)。若线圈的匝数为 N，磁链为 $N\Phi$，因 $N\Phi$ 与电流成正比，故有

$$N\Phi=LI \tag{2.9}$$

亨[利]

此比例系数 L 为线圈的自感，其单位为(Wb/A)，以**亨[利]**(H)表示。自感由线圈匝数、尺寸、空间的磁导率等确定。

根据法拉第定律，令 R 变化使线圈中流动的电流 I 变化，引起线圈的磁链发生变化，则在线圈中产生与所流电流方向相反的感应电动势，这种现象被称为自感(见图 2.62)。设在线圈中流有电流 I(A)时磁链为 $N\Phi$，若在 Δt(s)内有电流变化 ΔI(A)，磁链也会变化 $N\Delta\Phi$(Wb)。

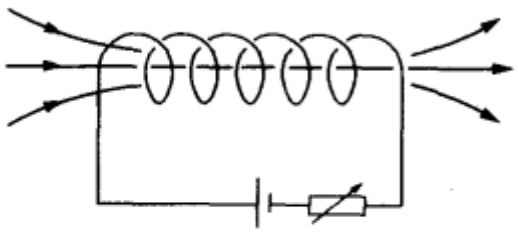


图 2.62 线圈的自感

由式(2.9)知

$$N\Delta\Phi=L\Delta I$$

再由法拉第定律，有

$$e=-\frac{N\Delta\Phi}{\Delta t}$$

$$=-L\frac{\Delta I}{\Delta t}\ (\mathrm{V})$$

例 题

[1] 设在自感为 200mH 的线圈中流动的电流在 0.05s 内从 5A 减小到 1A，求在线圈中感生的电动势。

答 $e=-L\dfrac{\Delta i}{\Delta t}$

$$=-200\times10^{-3}\times\frac{(1-5)}{5\times10^{-2}}$$

$$=1.6\ (\mathrm{V})$$

[2] 如图2.63所示，设在一次线圈内流动的电流以0.1s内有2.5A的变化率而变化。则当互感M为50mH时，在二次线圈中产生的电压是多少？

答　$$e=M\frac{\Delta i}{\Delta t}$$

$$=50\times10^{-3}\times\frac{2.5}{0.1}$$

$$=1.25\ (\mathrm{V})$$

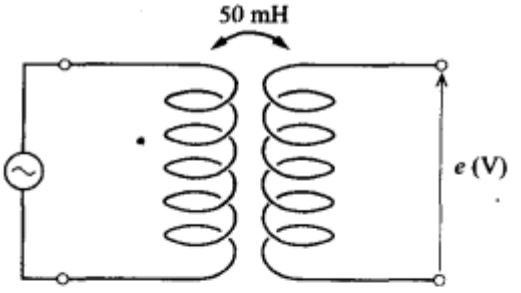


图 2.63　例题 2 图

[3] 设有自感$L_1=100\mathrm{mH}$、$L_2=200\mathrm{mH}$的两线圈电磁耦合，求其互感，已知耦合系数$k=0.8$。

答　$$M=k\sqrt{L_1L_2}$$

$$=0.8\sqrt{100\times200}$$

$$=113\ (\mathrm{mH})$$

第 3 章

交流电路

● 责任编委
大石清彦
● 执　　笔
渡边和之(1～19)

人们在日常生活中从家用电器插口上取来供电器产品使用的电，是大小和方向都随时间变化的交流电,它由发电厂生产，送往千家万户。

使用交流电源的电路称为交流电路，为了理解交流电路，有必要在直流电路知识的基础上，再学习有关交流波形的性质以及在电阻等元件的交流电路中具有的性质等方面的知识。

本章中，将从正弦波交流、交流的相量表示及复数表示等交流的基本知识开始，逐步学习单相交流电路、谐振电路、交流电桥、单相交流功率、三相交流电路、三相连接的种类与计算方法、三相交流功率、不对称三相电路的知识，进而再学习有关非正弦交流、过渡过程的知识，从而加深对交流电路的理解。

1　什么是交流

要　点

交流是随着时间的流逝，其大小和方向都变化的电流或电压。因为一般所使用的交流，其波形为正弦曲线，故称为正弦交流。

解　释

正弦交流电流

在图 3.1(a)所示的直流电路中所流过电流的大小是一定的，方向也不发生变化，如图 3.1(b)所示。与此相对应，在图 3.1(c)所示电路中所流过电流的大小和方向都随时间而发生变化，如图 3.1(d)所示。这种随时间而发生周期性变化的电流被称为**正弦交流电流**。

正弦交流电流

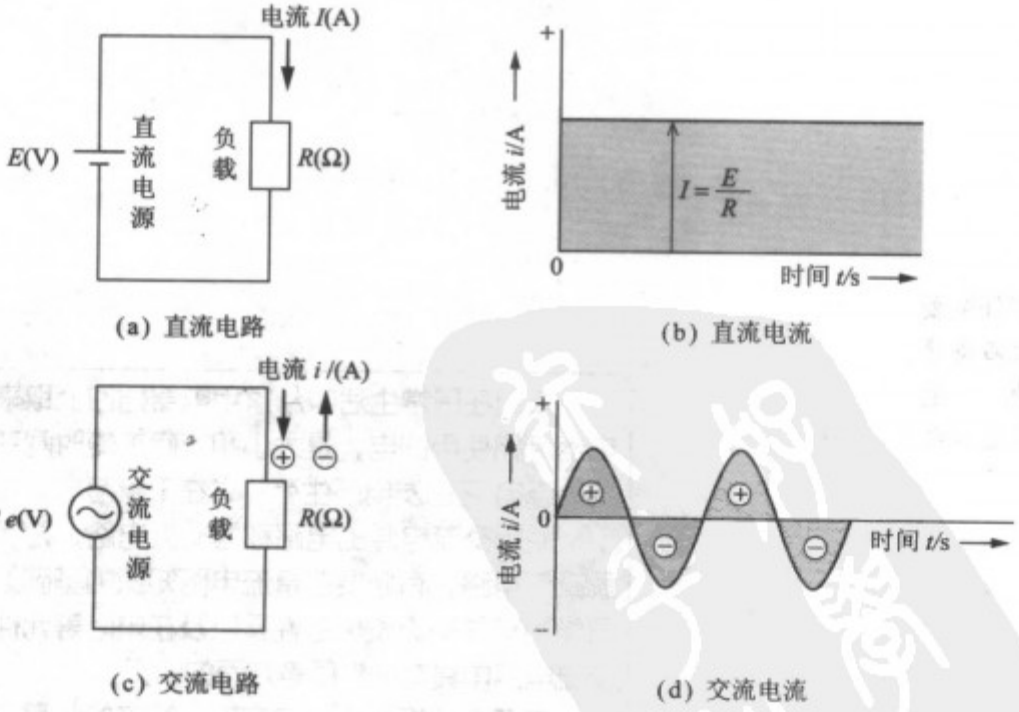


图 3.1　直流与交流

正弦交流电的产生

均匀磁场

如图 3.2(a)所示，在**均匀磁场**中放入一方形线圈 abcd，并由外力使其逆时针方向旋转，则依据电磁感应原理，

线圈中产生感应电动势。这时，根据弗莱明右手定则，在线圈边 ab、cd 中电动势的方向分别为 b→a，d→c。进而当线圈转过 180°时，则如图 3.2(b)所示，电动势的方向变为相反。换言之，如图 3.2(c)所示，当线圈的转角为 0～180°之间时，方向为 b→a，d→c；而线圈转角为 180°～360°时，则方向为 a→b，c→d。

今设均匀磁场的磁感应强度为 B(T)，线圈边的长度为 l(m)，与磁场方向垂直的平面与线圈平面之间夹角为 θ，线圈切割磁通的速度为 v(m/s)，则线圈中感生的电动势可用下式表示：

$$e=2Blv\sin\theta$$

交流电动势最大值

由上式可知，电动势 e 随线圈的转角 θ 成正弦波形变化，其最大值为 $2Blv$，令 $2Blv=E_m$，称 E_m 为**交流电动势的最大值**。感应电动势可表示为

$$e=E_m\sin\theta$$

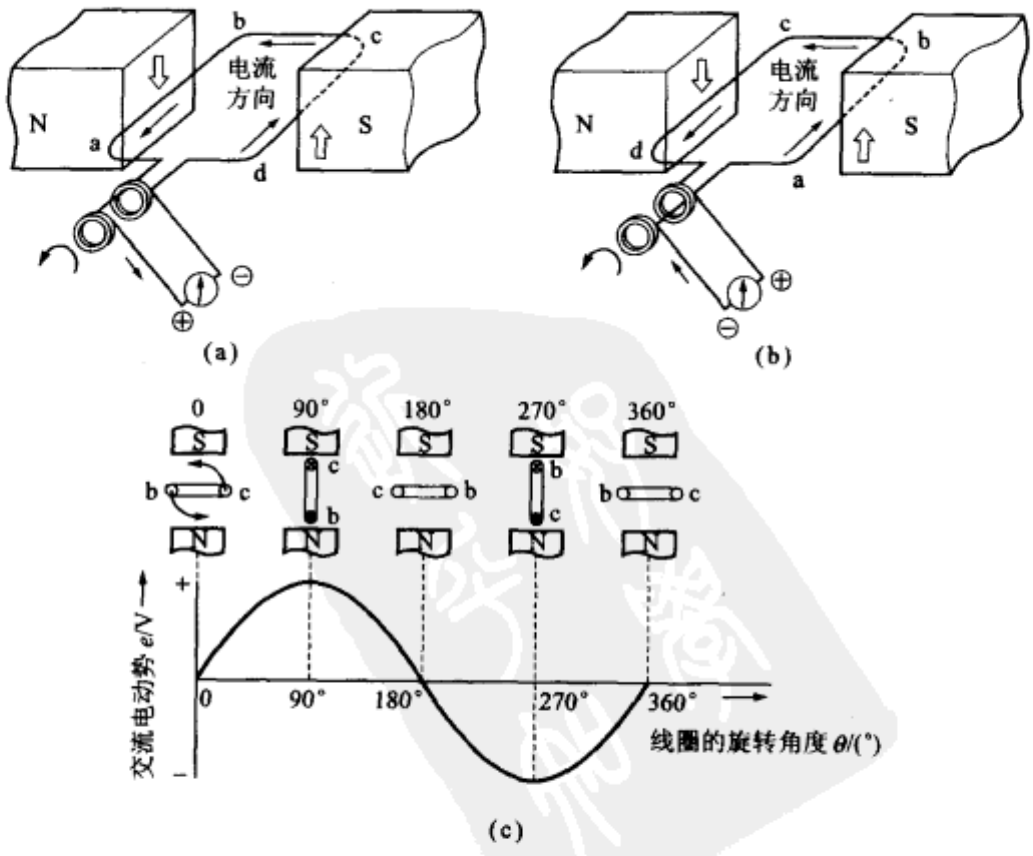
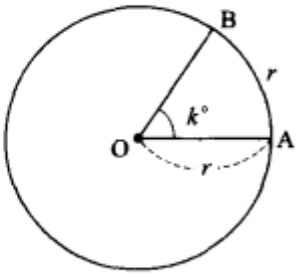


图 3.2　正弦交流电的产生原理

相关知识



$$\frac{r}{2\pi r}=\frac{k}{360}$$

$$k=\frac{180}{\pi}$$

则k与r无关，是一定的

图 3.3　弧度法

◆ 弧度法与角速度

在图 3.2 中，线圈的旋转角度 θ 是以度(°)为单位的。表示角度的大小除了以度为单位的方式称为 60′法之外，还有以弧度(rad)为单位的弧度法。在图 3.3 所示的半径为 r 的圆上，对应于与半径等长的圆弧$\overset{\frown}{AB}$的中心角的大小 $k°$ 与圆的半径无关，是一定的。称此一定大小的角度为 1rad。以此为单位来表示角度的大小。就是弧度法。例如，因圆周长度为 $2\pi r$，故 360° 相当于 2π(rad)。

再有，将 1s 间变化的角度大小称为角速度，以 ω(rad/s)表示。利用角速度 ω(rad/s)来表示旋转角度 θ 与 t(s)之间的关系则为

$$\theta=\omega t\ (\text{rad})$$

例 题

[1] 在磁感应强度为 0.05T 的均匀磁场中，使一边长为 0.2m 的方形线圈旋转，如想获得最大电动势为 0.5V，则此线圈旋转的线速度应为多少？

答 由 $e=2Blv\sin\theta$ 可知

$$v=\frac{e}{2Bl\sin\theta}=\frac{0.5}{2\times0.05\times0.2\times1}=25\ (\text{m/s})$$

[2] 当正弦交流电动势的最大值 E_m 为 150V 时，线圈的旋转角度 θ 为下列数值时 e 是多少？

(1) $\theta=150°$　　(2) $\theta=270°$

答 (1) $e=E_m\sin\theta=150\times\sin150°=150\times0.5=75$ (V)

(2) $e=150\times\sin270°=150\times(-1)=-150$ (V)

选修知识

◆ 一般角度的三角函数

在坐标平面上，以原点 O 为圆心半径为 1 的圆，与表示一般角度 θ 的转动

半径相交的交点 P，其坐标如以(x,y)表示，如图 3.4 所示，则有

$$y=\sin\theta$$

$$x=\cos\theta$$

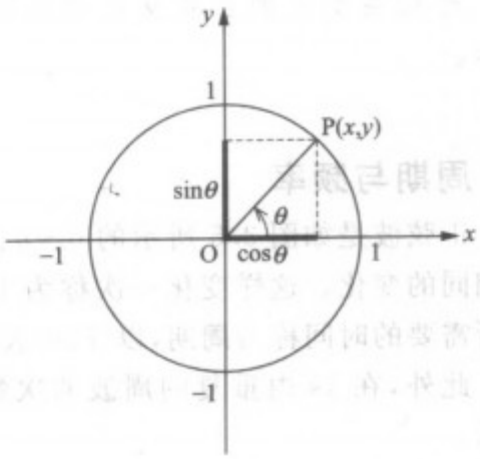


图 3.4　单位圆与三角函数

表 3.1 表示的是典型的三角函数值。

表 3.1　典型的三角函数值

$\theta/(^\circ)$	0	30	45	60	90	120	135	150	180
θ/rad	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\frac{5\pi}{6}$	π
$\sin\theta$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
$\cos\theta$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{\sqrt{2}}{2}$	$-\frac{\sqrt{3}}{2}$	-1
$\tan\theta$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	1	$\sqrt{3}$		$-\sqrt{3}$	-1	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$	0

2　正弦交流的频率与相位

要　点

时刻在变化的正弦交流电的波形，用频率和大小来表示。

解　释

周期与频率

正弦波是如图 3.5 所示的 $0\sim a$、$a\sim b$ 这样周期性地重复相同的变化。这样变化一次称为 1 个周波。完成 1 个周波所需要的时间称为**周期**，以 T(s)表示。

周期

频率

此外，在 1s 内重复的周波的次数称为**频率**，以 f(Hz)表示。

因此，周期 T 与频率 f 具有下列关系：

$$T=\frac{1}{f}\text{(s)}\quad \text{或}\quad f=\frac{1}{T}\text{(Hz)}$$

另外，由于完成 1 个周期需要 2π(rad)角度，故若 1s 内有 f 次正弦波，则角速度 ω 为：

$$\omega=2\pi f\ \text{(rad/s)}$$

角频率

式中，ω 因与频率 f 有关，故又称**角频率**。

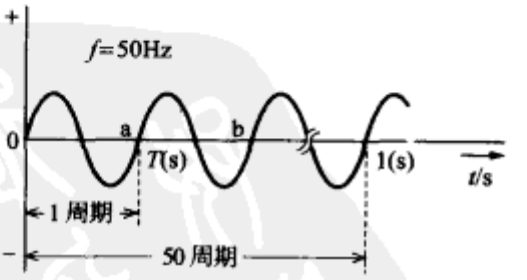


图 3.5　周期与频率

相位与相位差

图 3.6 所示的三个交流电压 v_1、v_2、v_3(V)的波形有时间上的偏移，这种偏移的角度称为**相位差**，v_2 与 v_1 的相位差为 θ_1，v_2 与 v_3 的相位差为 $\theta_1+\theta_2$。而它们的波形可用如下式子表示：

相位差

$$v_1 = V_m \sin\omega t \quad (V)$$

$$v_2 = V_m \sin(\omega t + \theta_1) \quad (V)$$

$$v_3 = V_m \sin(\omega t - \theta_2) \quad (V)$$

初相角

式中，θ_1、$-\theta_2$ 分别称为 v_2、v_3 的**初相角**。

相位

由此可知，v_2 比 v_1 **超前** θ_1 相位，v_3 比 v_1 **滞后** θ_2 **相位**。

同相

再有，若是相位一致（相位差为 0）的两个交流波形，无论谁对谁均称为**同相**。

由于一般所用交流为正弦波且频率是一定的，故只要知道了其大小与初相角，此交流为何样波形即可确定。

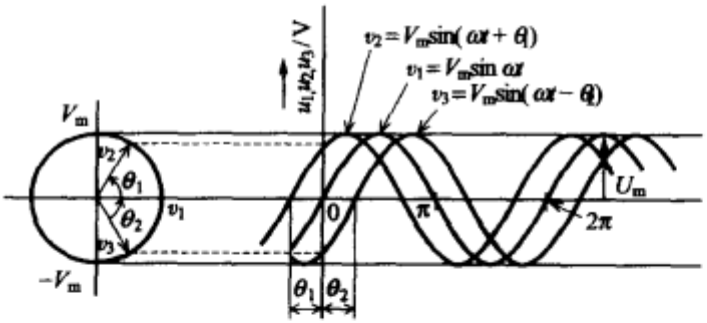


图 3.6　交流电压的相位

例　题

[1] 试求频率为 50Hz 的正弦交流的周期和角频率。

答　$T = \dfrac{1}{f} = \dfrac{1}{50} = 0.02(\text{s}) = 20 \ (\text{ms})$

$\omega = 2\pi f = 2 \times \pi \times 50 = 100\pi \ (\text{rad/s})$

[2] 求 $v_1 = 50\sin(20\pi t + \pi/3)$、$v_2 = 100\sin(20\pi t - \pi/6)$ 这两个正弦波之间的相位差。

答　$\theta = \dfrac{\pi}{3} - \left(-\dfrac{\pi}{6}\right) = \dfrac{\pi}{2} \ (\text{rad})$

3　正弦交流的表示方法

要　点

正弦交流虽然是随时间而变化，但若作为一定的量来表示其大小，可用最大值、平均值、有效值等来表示。

解　释

瞬时值与最大值

瞬时值

我们将时刻变化的正弦交流在各个时刻的大小，称为**瞬时值**，可用下式表示：

$$v=V_m\sin(\omega t+\theta)$$

再者，表示瞬时值在最大时的大小，称为最大值，以 V_m 表示。

这样，交流的瞬时值就由最大值(V_m)、波形(sin)、变化的速率(ω)及初相角(θ)来表示。

平均值

平均值

由于正弦交流的波形是由横轴上的正半波和负半波而构成，故其1个周期内的平均值为0。因此，不是取其1个周期内的平均值，而是将正或负的半个周期内的平均值称为**平均值**(见图3.7(a))，其符号为电压用 V_a，电流用 I_a。

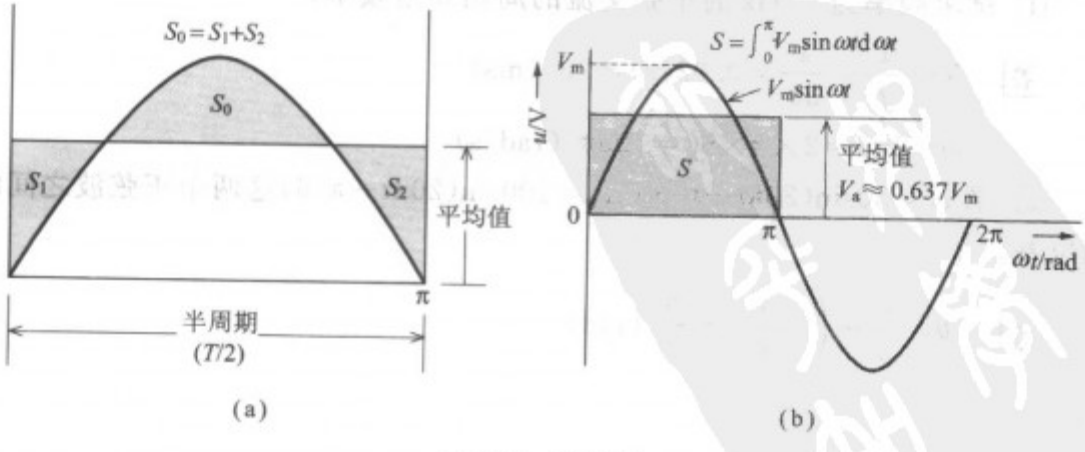


图3.7　平均值

由图3.7(b)可求平均值如下：

$$V_a=\frac{1}{\pi}\int_0^{\pi}V_m\sin\omega t\,d\omega t=\frac{V_m}{\pi}\int_0^{\pi}\sin\omega t\,d\omega t$$

$$= \frac{V_m}{\pi}[-\cos\omega t]_0^{\pi} = \frac{V_m}{\pi}[-\cos\pi-(-\cos 0)]$$

$$= \frac{2}{\pi}V_m \approx 0.637V_m \ (\mathrm{V})$$

有效值

所谓交流的有效值，就是用与此交流具有相同作用的直流的大小来表示。

如图 3.8(a)所示，直流电流 I(A)流过电阻 R(Ω)时，在电阻上消耗的功率 P_d(W)为：

$$P_d = I^2R$$

另一方面，再如图 3.8(b)这样将瞬时值为 $i = I_m\sin\omega t$(A)的交流电流流入同一电阻，则瞬间消耗的功率为 i^2R。因此，1 周期内的平均功率 P_a(W)则为：

$$P_a = (i^2 \text{ 在 1 周期内的平均值}) \times R$$

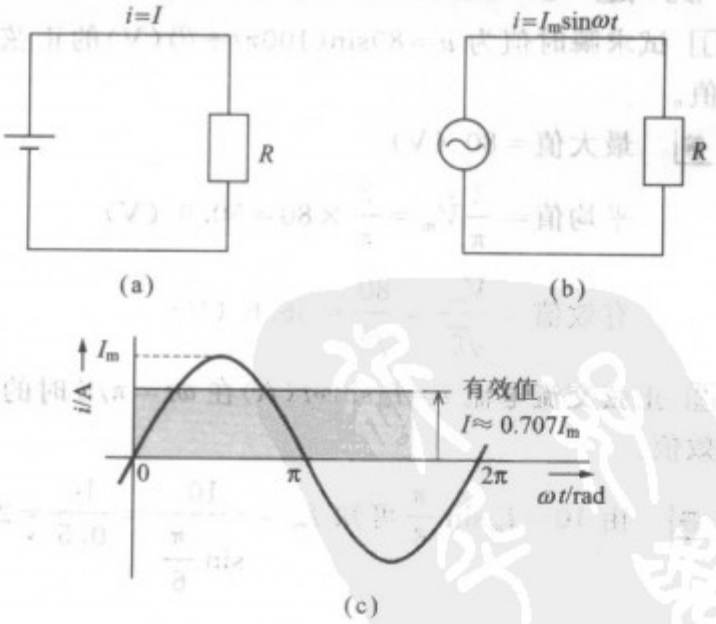


图 3.8　有效值

如果直流与交流所产生的热效应完全相同，则有

$$P_d = P_a$$

$$I^2R = (i^2 \text{ 在 1 周期的平均值}) \times R$$

$$I = \sqrt{(i^2 \text{ 在 1 周期内的平均值})}$$

有效值

将这个 I 的数值称为交流电流 i 的**有效值**。

这里，$i^2=I_m^2\sin^2\omega t$ 在 1 周期内的平均值为：

$$i^2\text{ 在 1 周期内的平均值}=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}I_m^2\sin^2\omega t\,\mathrm{d}\omega t$$

$$=\frac{I_m^2}{2\pi}\int_0^{2\pi}\frac{1}{2}(1-\cos2\omega t)\,\mathrm{d}\omega t$$

$$=\frac{I_m^2}{4\pi}\left[\omega t-\frac{\sin2\omega t}{2}\right]_0^{2\pi}=\frac{I_m^2}{2}$$

因此，I 可表示如下：

$$I=\sqrt{\frac{I_m^2}{2}}=\frac{I_m}{\sqrt{2}}\approx0.707I_m\ (\mathrm{A})$$

即有效值为最大值的 $1/\sqrt{2}$ 倍。对于电压也可按同理求得。

例　题

[1] 试求瞬时值为 $u=80\sin(100\pi t+\theta)$(V)的正弦交流的最大值、平均值、有效值。

答　最大值＝80（V）

$$\text{平均值}=\frac{2}{\pi}V_m=\frac{2}{\pi}\times80=50.9\ (\mathrm{V})$$

$$\text{有效值}=\frac{V_m}{\sqrt{2}}=\frac{80}{\sqrt{2}}=56.6\ (\mathrm{V})$$

[2] 正弦交流电流 $i=I_m\sin\omega t$(A)在 $\omega t=\pi/6$ 时的瞬时值为 10A，求此电流的有效值。

答　由 $10=I_m\sin\dfrac{\pi}{6}$ 可知 $I_m=\dfrac{10}{\sin\dfrac{\pi}{6}}=\dfrac{10}{0.5}=20\ (\mathrm{A})$

$$\text{则有效值}=\frac{20}{\sqrt{2}}=14.14\ (\mathrm{A})$$

4　交流的相量表示

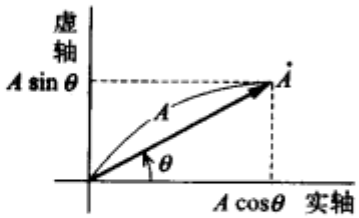
要　点

像长度、时间、质量等这样仅以大小就可确定的量称为标量，与此相对应有位移、力、速度等既有大小又有方向的量，这些量称为矢量。交流与直流不同，因其具有大小和相位故将其作为相量来运作，这样在求其和或差等计算上都很方便。

解　释

矢量的表示方法

当将矢量用符号来表示时，可如 $\dot{A}$ 这样在字母上加一点来表示，矢量 $\dot{A}$ 的数学表示式有如图 3.9 所示，以其大小 A 和其与实轴的夹角 θ 来表示的极坐标表示，和以实数与虚数来表示的直角坐标表示方法。



极坐标表示

$\dot{A}=A\angle\theta$

直角坐标表示

$\dot{A}=A\cos\theta+jA\sin\theta$

图 3.9　矢量的表示方法

正弦交流的相量表示

当图 3.10(a)所示的大小为 I_m(A)、初始角度为 θ(rad)的相量以一定的角速度 ω(rad/s)逆时针方向旋转时，称此相量 $\dot{I}_m$ 为旋转相量。由于 $\dot{I}_m$ 的角度随时间而变化，经 t(s)时间后变为 $\omega t+\theta$，故若令 $\dot{I}_m$ 的 y 分量为 i，则 i 的变化可用下式表示：

$$i=I_m\sin(\omega t+\theta)$$

这里如将 i 的变化以 ωt 为横轴画成图，则如图 3.10(b)

所示为正弦波形。因此，最大值为 I_m、初相角为 θ 的正弦交流，可用转动半径为 I_m、夹角为 $\omega t+\theta$ 的旋转相量来表示。然而，由于一般交流的大小多用有效值表示，故可将正弦交流用**相量**表示如下：

相量

$$\text{正弦交流}\quad i=100\sqrt{2}\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{4}\right)$$

$$\text{相　　量}\quad \dot{I}=100\angle\frac{\pi}{4}$$

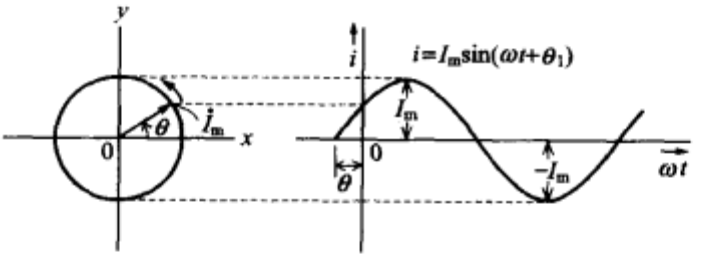
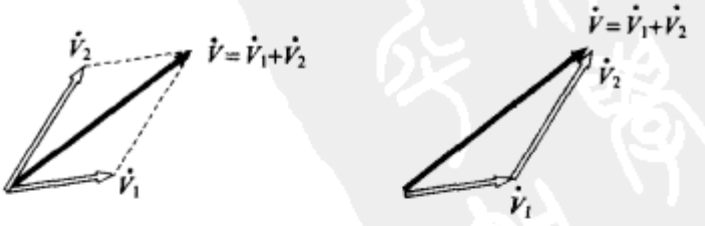


图 3.10　旋转相量与正弦交流

相关知识

◆ 相量的运算

无论一个数或是式子，对相量而言都可使用加法或减法的运算。例如，求两个相量 $\dot{V}_1$、$\dot{V}_2$ 之和 $\dot{V}$ 时，可以用图 3.11 所示将 $\dot{V}_1$、$\dot{V}_2$ 作为平行四边形的两个边，求出与 $\dot{V}_1$、$\dot{V}_2$ 的始点一致的对角线 $\dot{V}$ 的方法；也可用在 $\dot{V}_1$ 的终点上平行接以 $\dot{V}_2$，再由 $\dot{V}_1$ 的始点向 $\dot{V}_2$ 的终点作出相量 $\dot{V}$ 的方法。



(a) 用平行四边形法求和　　(b) 用平行移动法求和

图 3.11　相量之和

其次，来求两个相量之差 $\dot{V}_1-\dot{V}_2$。可如图 3.12 所示，先作出一个大小等于 $\dot{V}_2$、方向与其相反的相量 $-\dot{V}_2$，再求 $\dot{V}_1$ 与 $-\dot{V}_2$ 的相量之和就行。

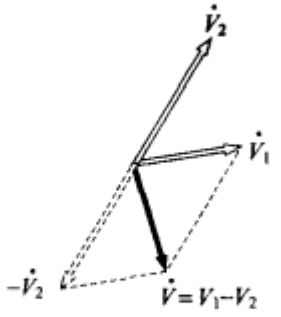


图 3.12　相量之差

例　题

[1] 将下列交流电压、电流以相量(极坐标形式)表示：

(1) $v=120\sqrt{2}\sin 30t$ (V)　(2) $i=80\sin\left(20t-\frac{\pi}{4}\right)$ (A)

答　(1) $\dot{V}=120\angle 0$

(2) $\dot{I}=40\sqrt{2}\angle -\frac{\pi}{4}$

[2] 将图 3.13 所示电压相量 $\dot{V}_1$、$\dot{V}_2$、$\dot{V}_3$ 以瞬时值来表示。已知 $\omega=15$(rad/s)。

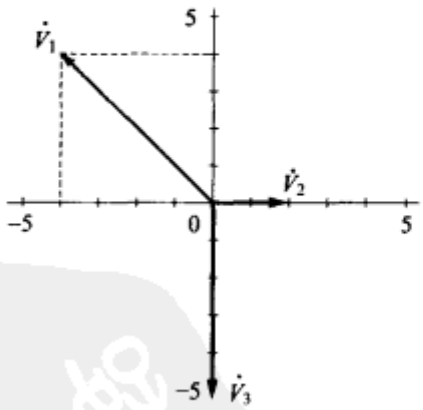


图 3.13　例题 2 图

答　由于相量的大小是以有效值表示，角度是以初相角表示的，故 $\dot{V}_1$、$\dot{V}_2$、$\dot{V}_3$ 的瞬时值 $\dot{v}_1$、$\dot{v}_2$、$\dot{v}_3$ 分别如下式所示：

$$v_1=8\sin\left(15t+\frac{3}{4}\pi\right)\text{ (V)}$$

$$v_2=2\sqrt{2}\sin 15t\text{ (V)}$$

$$v_3=5\sqrt{2}\sin\left(15t-\frac{\pi}{2}\right)\text{ (V)}$$

5　相量的复数表示

要　点

相量可以用复数表示，采用复数可使交流电路的计算变成代数运算来进行。

解　释

将其平方为－1的某数表示的 j，称为虚数单位。即

$$j^2=-1,\ j=\sqrt{-1}$$

这在数学上是采用 i 为符号的，但在电工学上为避免与电流的符号 i 混淆，故习惯上采用 j。

复数

若 a、b 为实数，则称以 $\dot{Z}=a+jb$ 形式表示的数为**复数**。此外，将 $b\neq0$ 时的 jb 称为虚数。

相量与复数

复平面

如图3.14所示令 x 轴为实轴、y 轴为虚轴，则复数 $a+jb$ 与坐标点 (a,b) 对应，称这样的坐标平面为**复平面**。在这里，通常来考虑由坐标原点引向坐标 (a,b) 点的相量，则知相量可与复数对应，相量 $\dot{A}$ 可用下列复数表示：

$$\dot{A}=a+jb$$

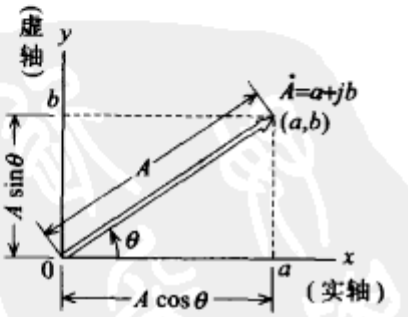


图3.14　复平面与相量

复数 $\dot{A}=a+jb$ 的绝对值 A 与幅角 θ，以及与实部 a 和虚部 b 之间的关系可表示如下：

$$A=\sqrt{a^2+b^2}\quad \theta=\arctan\frac{b}{a}$$

$$a=A\cos\theta\quad b=A\sin\theta$$

则 $\dot{A}=A(\cos\theta+j\sin\theta)$ (3.1)

式(3.1)被称为极坐标形式[1)]。

另外，相量 $\dot{A}$ 乘以 $\pm j$ 则有

$$j\dot{A}=A(j\cos\theta+j^2\sin\theta)=A(-\sin\theta+j\cos\theta)$$

$$-j\dot{A}=A(-j\cos\theta-j^2\sin\theta)=A(\sin\theta-j\cos\theta)$$

如图 3.15 所示，$\dot{A}$ 的相位在乘 j 后变成超前 $\pi/2$，乘 $-j$ 后则是滞后 $\pi/2$。

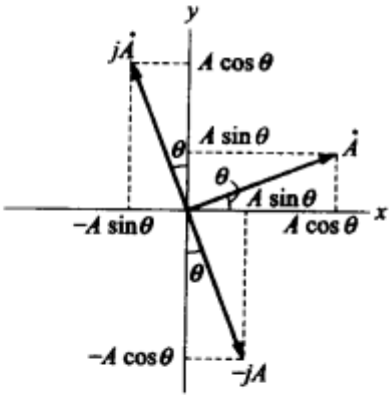


图 3.15 相量与 $\pm j$ 之积

◆ 复数的四则运算

设有两个复数 $\dot{X}=a+jb$，$\dot{Y}=c+jd$，则其四则运算可如下进行：

加减运算 $\dot{X}\pm\dot{Y}=(a+jb)\pm(c+jb)=(a\pm c)+j(b\pm d)$

乘法运算 $\dot{X}\dot{Y}=(a+jb)(c+jd)=ac+jad+jbc+j^2bd$

$$=(ac-bd)+j(ad+bc)$$

除法运算 $$\frac{\dot{X}}{\dot{Y}}=\frac{(a+jb)}{(c+jd)}=\frac{(a+jb)(c-jd)}{(c+jd)(c-jd)}=\frac{(ac+bd)+j(bc-ad)}{c^2+d^2}$$

$$=\frac{ac+bd}{c^2+d^2}+j\,\frac{bc-ad}{c^2+d^2}$$

1) 原文如此。按极坐标形式应为 $\dot{A}=A\angle\theta$。 ——译者注

例　题

[1] 求 $\dot{I}=4+3j$ 的瞬时值表达式。

答 有效值为　$I=\sqrt{4^2+3^2}=5$

初相角为　$\theta=\arctan\dfrac{3}{4}=36.9°$

故瞬时值表达式为　$i=5\sqrt{2}\sin(\omega t+36.9°)$

[2] 设 $\dot{A}=6+j8$，$\dot{B}=5+j12$，求 $\dot{A}+\dot{B}$、$\dot{A}\dot{B}$。

答 相量的运算中，求和、差时用直角坐标形式；求积、商时用极坐标形式较为方便。将 $\dot{A}$、$\dot{B}$ 用极坐标形式表示则有

$$\dot{A}=\sqrt{6^2+8^2}\angle\arctan\frac{8}{6}=10\angle 53.1°$$

$$\dot{B}=\sqrt{5^2+12^2}\angle\arctan\frac{12}{5}=13\angle 67.4°$$

$$\dot{A}+\dot{B}=(6+j8)+(5+j12)=11+j20$$

$$\dot{A}\cdot\dot{B}=10\angle 53.1°\cdot 13\angle 67.4°=130\angle 120.5°$$

$$=130(\cos 120.5°+j\sin 120.5°)\approx -66+j112$$

6　纯 R、L、C 交流电路

要　点

当将交流电压 $u=\sqrt{2}V\sin\omega t$(V)施加到仅有电阻 R(Ω)或电感 L(H)或电容 C(F)元件的电路时，在各元件中所流的电流为

$$I_R=\frac{V}{R}\ (\mathrm{A})$$

$$I_L=\frac{V}{X_L}\ (\mathrm{A})$$

$$I_C=\frac{V}{X_C}\ (\mathrm{A})$$

式中，X_L 称为感抗，X_C 称为容抗。

解　释

在仅有电阻 R 的电路上施加交流电压时

如图 3.16 所示，将交流电压 $v=\sqrt{2}V\sin\omega t$(V)施加到电阻 R(Ω)上时，在电阻中所流的电流 i_R 可按欧姆定律计算为

$$i_R=\frac{v}{R}=\sqrt{2}\frac{V}{R}\sin\omega t=\sqrt{2}I_R\sin\omega t\ (\mathrm{A})\qquad(3.2)$$

由此可知，电流与电压的有效值之间关系为

$$I_R=\frac{V}{R}\ (\mathrm{A})$$

这里由式(3.2)可知，电压 v 与电流 i_R 的相位差为 0，即

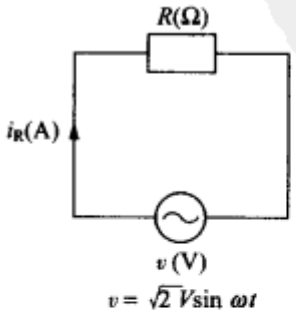


图 3.16　单一电阻的电路

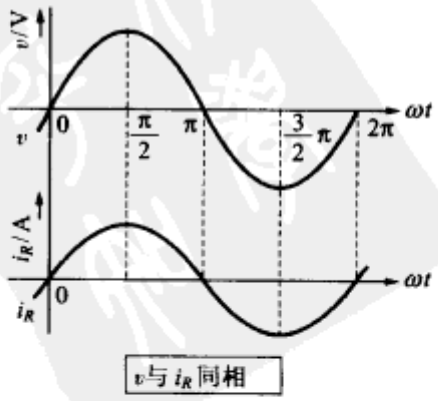


图 3.17　电阻电路的波形

同相。因此，阻抗 Z 为：

$$Z=\frac{\dot{V}}{\dot{I}_R}=\frac{V\angle 0}{I_R\angle 0}=\frac{V}{I_R}\angle 0$$

式中，若令 $V/I_R=R$，则 $Z=R$。图 3.17 表示波形，图 3.18 表示**相量图**。

相量图

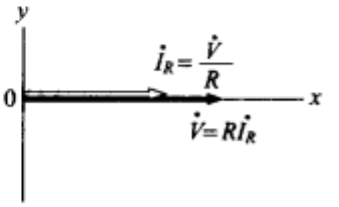


图 3.18　电阻电路的相量图

在仅有电感 L 的电路上施加交流电压时

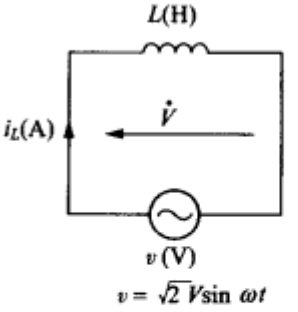


图 3.19　单一电感的电路

如图 3.19 所示，在具有电感 L(H)的线圈上施加交流电压 $v=\sqrt{2}V\sin\omega t$(V)，则有电流流动并产生磁通。随着交流电流的变化，磁通也变化，故依据法拉第定律在线圈中产生感应电动势。如图 3.20 所示，在由 0～b 电流增大时，按楞次定律电动势为反方向，即为负；而当由 b～d 电流减小时，电动势则为正方向。在通过 a、c 点时，电流的变化最大，故电动势也最大；而当电流通过 b、d 点时，由于电流没有变化，故电动势为 0(设以电流的流入方向为正)。

其次，在线圈上施加的电压 u 与感生的电动势 e 通常大小相等、方向相反(见图 3.21)。因此，v 与 e 具有下列关系：

$$v=-e=L\frac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t}$$

由此式可知，

$$\frac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t}=\frac{v}{L}=\sqrt{2}\frac{V}{L}\sin\omega t$$

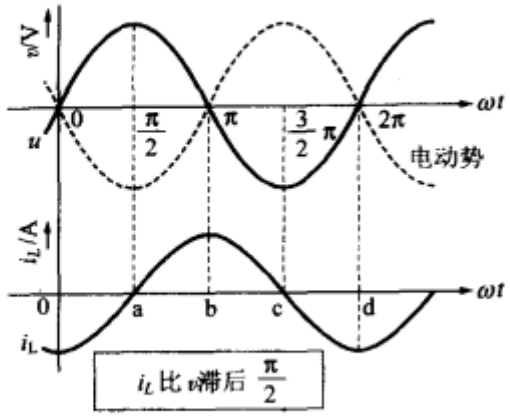


图 3.20 单一电感电路的波形

$$\text{则 } i_L = \sqrt{2}\frac{V}{L}\int \sin\omega t = \sqrt{2}\frac{V}{\omega L}(-\cos\omega t)$$

$$= \sqrt{2}\frac{V}{\omega L}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \tag{3.3}$$

电压与电流的关系如用有效值来表示，则有

$$I_L = \frac{V}{\omega L} = \frac{V}{X_L}$$

式中，$X_L = \omega L$ 表示线圈阻碍电流流动的作用，称为感抗，单位以 Ω 表示。

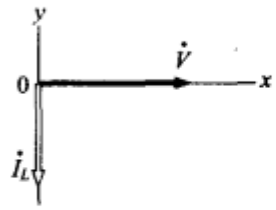


图 3.21 单一电感电路的相量图

此外，感抗与频率 f(Hz)成正比，可用下式表示：

$$X_L = \omega L = 2\pi fL$$

再有，由式(3.3)可知，电流 i_L 的相位比电压 V 的相位**滞后**π/2(rad)。因此，**阻抗** Z 为：

滞后

阻抗

$$\dot{Z} = \frac{\dot{V}}{\dot{I}_L} = \frac{V\angle 0}{I_L\angle -\frac{\pi}{2}} = \frac{V}{I_L}\angle\frac{\pi}{2}$$

这里因 $V/I_L = \omega L$，故可写成 $Z = \omega L\angle\frac{\pi}{2} = j\omega L$。

在仅有电容 C 的电路上施加交流电压时

如图 3.22 所示，在具有电容 C(F)的电容器上施加交流

电压 $v=\sqrt{2}V\sin\omega t$(V)，由于每过半波电压的方向就变化，故电容器反复进行充、放电而有电流流动(见图 3.23)。此时，在电容器上储存的电荷 q 如下所示：

$$q=Cv=\sqrt{2}CV\sin\omega t \quad (C)$$

因为电容器内流动的电流就是单位时间内移动的电荷量，故有

$$i_C=\frac{dq}{dt}=\sqrt{2}CV\frac{d}{dt}(\sin\omega t)=\sqrt{2}\omega CV\cos\omega t$$

$$=\sqrt{2}\omega CV\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right) \qquad (3.4)$$

则 $I_C=\omega CV=\dfrac{V}{X_C}$

这里 $X_C=1/\omega C$ 表示电容器阻碍电流流动的作用，称为容抗，单位为 Ω。

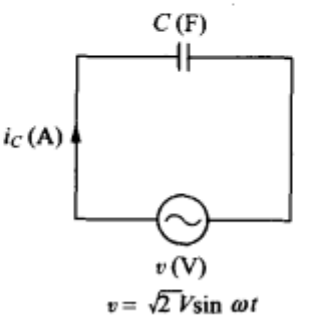


图 3.22　单一电容电路

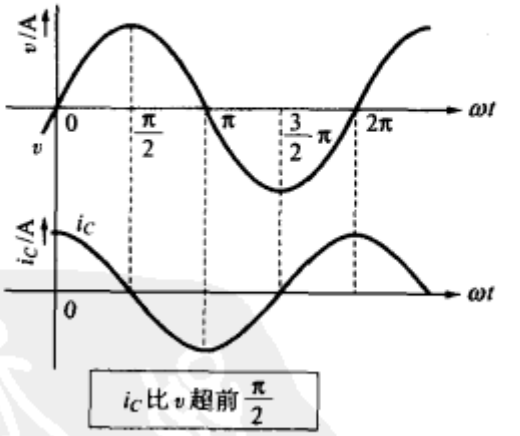


图 3.23　单一电容电路的波形

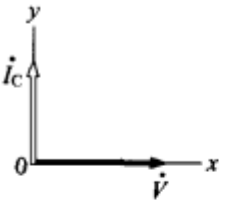


图 3.24　单一电容电路的相量图

此外，容抗与频率 f(Hz)成反比，可用下式表示：

$$X_C=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{2\pi fC}$$

再有，由式(3.4)可知，电流 i_C 与电压 v 相比其相位**超前** π/2(见图 3.24)。因此，阻抗为

超前

$$Z=\frac{\dot{V}}{\dot{I}_C}=\frac{V\angle 0}{I_C\angle\frac{\pi}{2}}$$

$$=\frac{V}{I_C}\angle-\frac{\pi}{2}$$

这里因$\frac{V}{I_C}=\frac{1}{\omega C}$，故

$$Z=\frac{1}{\omega C}\angle-\frac{\pi}{2}=-j\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{j\omega C}$$

例 题

[1] 设在电感为500mH的线圈上施加50Hz、100V的交流电压，求此电路中的电流。

答 感抗X_L为：

$$X_L=2\pi fL=2\pi\times 50\times 0.5=157\ (\Omega)$$

线圈中所流电流I为：

$$I=\frac{U}{X_L}=\frac{100}{157}=0.637\ (\mathrm{A})$$

[2] 已知在电容为10μF的电容器中有50Hz、0.315A的电流流动。求在此电容器上所施加的电压。

答 容抗X_C为：

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\pi\times 50\times 10\times 10^{-6}}=318\ (\Omega)$$

施加到电容器上的电压V为：

$$V=X_CI=318\times 0.315=100\ (\mathrm{V})$$

7　单相交流电路

要　点

在单相交流电路中，具有阻碍电流流动作用的物理量被称为阻抗，用符号 Z 表示，并有下列关系：

$$Z=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}\ (\Omega)$$

此外，将电压 $\dot{V}$ 与电流 $\dot{I}$ 的相位差称为阻抗角。

解　释

RLC 串联电路

当在图 3.25 所示的 RLC 串联电路上施加电压 $\dot{V}$ 时，即有电流 $\dot{I}$ 流动，电压 $\dot{V}$ 与其在 R、L、C 上的分压 $\dot{V}_R$、$\dot{V}_L$、$\dot{V}_C$ 的关系为

$$\dot{V}=\dot{V}_R+\dot{V}_L+\dot{V}_C$$

因为 $\dot{V}_R$ 的相位与 $\dot{I}$ 同相，$\dot{V}_L$ 的相位超前 $\dot{I}$ 为 $\pi/2$(rad)，$\dot{V}_C$ 的相位滞后 $\dot{I}$ 为 $\pi/2$(rad)，因此 $\dot{V}$ 的大小可表示如下：

$$V=\sqrt{U_R^2+(U_L-U_C)^2}\ (\mathrm{V})$$

式中，$V_R=RI$，$V_L=X_LI$，$V_C=X_CI$，因此有

$$V=\sqrt{(RI)^2+(X_LI-X_CI)^2}=I\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}$$

则 $$I=\frac{V}{\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}}=\frac{V}{Z}\ (\mathrm{A})$$

将 $Z=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}$ 称为阻抗，单位为 Ω，在电路中起阻碍电流流动的作用。

阻抗角

此外，由图 3.26 可知**阻抗角** θ 的范围为 $-\frac{\pi}{2}\leqslant\theta\leqslant\frac{\pi}{2}$，可表示如下：

$$\theta=\arctan\frac{V_L-V_C}{V_R}=\arctan\frac{X_L-X_C}{R}$$

$$=\arctan\frac{\omega L-\left(\frac{1}{\omega C}\right)}{R}\ (\mathrm{rad})$$

由图 3.26 可知，对 $X_L>X_C$ 的电路，电流 $\dot{I}$ 与电源电压

$\dot{V}$ 的相位差 θ 为滞后；而在 $X_L < X_C$ 的电路中，电流与电源电压的相位差 θ 则为超前。前者称感性，后者称容性电路。

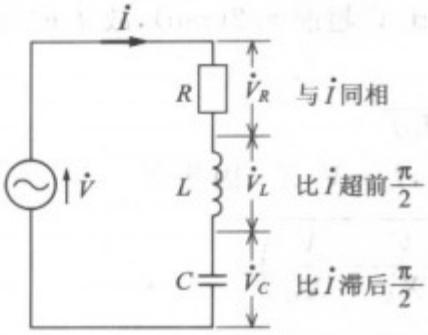


图 3.25 *RLC* 串联电路

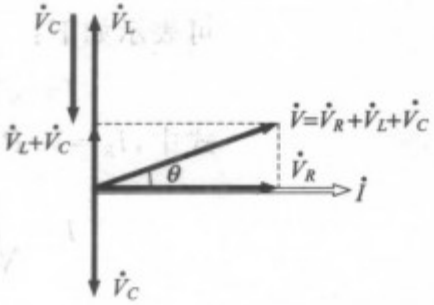
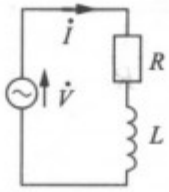
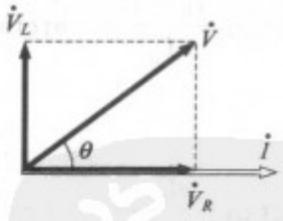
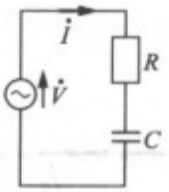
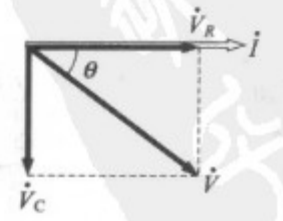


图 3.26 *RLC* 串联电路的相量图

RL、*RC* 串联电路

表 3.2 中列出了 *RL*、*RC* 电路的情况。

表 3.2 *RL*、*RC* 串联电路

电路构成	电路图	相量图	阻抗	电压与电流的相位差
RL 串联			$Z=R+jX_L$ $\lvert Z\rvert=\sqrt{R^2+X_L^2}$	$\theta=\arctan\frac{X_L}{R}$
RC 串联			$Z=R-jX_C$ $\lvert Z\rvert=\sqrt{R^2+X_C^2}$	$\theta=\arctan\frac{X_C}{R}$

RLC 并联电路

在图 3.27 所示的 *RLC* 并联电路中，总电流 $\dot{I}$ 与各元件中的电流 $\dot{I}_R$、$\dot{I}_L$、$\dot{I}_C$ 之间的关系为

$$\dot{I}=\dot{I}_R+\dot{I}_L+\dot{I}_C$$

因为 $\dot{I}_R$ 的相位与 $\dot{V}$ 同相(见图 3.28)，$\dot{I}_L$ 的相位比 $\dot{V}$ 滞后 $\pi/2$(rad)，$\dot{I}_C$ 的相位比 $\dot{V}$ 超前 $\pi/2$(rad)，故 $\dot{I}$ 的大小 I 可表示如下：

$$I=\sqrt{I_R^2+(I_L-I_C)^2}$$

式中，$I_R=V/R$，$I_L=V/X_L$，$I_C=V/X_C$，因此有

$$I=\sqrt{\left(\frac{V}{R}\right)^2+\left(\frac{V}{X_L}-\frac{V}{X_C}\right)^2}$$

$$=V\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2+\left(\frac{1}{X_L}-\frac{1}{X_C}\right)^2}=\frac{V}{|Z|}\ (\mathrm{A})$$

阻抗 Z、阻抗角 θ 可表示如下：

$$|Z|=\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2+\left(\frac{1}{X_L}-\frac{1}{X_C}\right)^2}}\ (\Omega)$$

$$\theta=\arctan\frac{I_L-I_C}{I_R}=\arctan\frac{\frac{1}{X_L}-\frac{1}{X_C}}{\frac{1}{R}}$$

$$=\arctan\frac{\frac{1}{\omega L}-\omega C}{\frac{1}{R}}\ (\mathrm{rad})$$

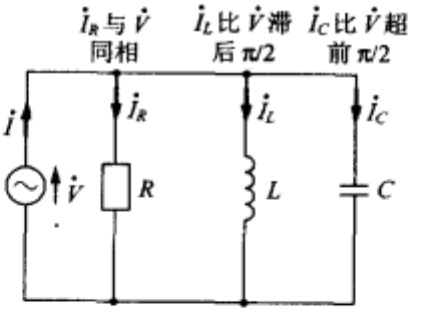


图 3.27　*RLC* 并联电路

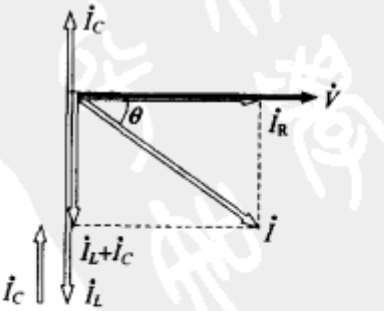


图 3.28　*RLC* 并联电路的相量图

例　题

[1] 已知在图 3.25 所示 *RLC* 串联电路中 $R=100(\Omega)$，$L=20(\text{mH})$，$C=200(\mu\text{F})$，$u=250\sqrt{2}\sin 20\pi t(\text{V})$，试回答下列问题：

(1) 求总阻抗 $|Z|$。

(2) 求阻抗角 θ。

(3) 用瞬时值表示电路中的电流。

答　(1) 首先求出感抗 X_L、容抗 X_C：

$$X_L=\omega L=20\pi\times 20\times 10^{-3}=1.3$$

$$X_C=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{20\pi\times 200\times 10^{-6}}=80$$

则 $|Z|=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}=\sqrt{100^2+(1.3-80)^2}=127\ (\Omega)$

(2) $\theta=\arctan\dfrac{X_L-X_C}{R}\arctan\dfrac{1.3-80}{100}=-38^\circ$

(3) $i=\dfrac{U_m}{Z}\sin(\omega t-\theta)=\dfrac{250\sqrt{2}}{127}\sin(20\pi t+38^\circ)$

$=1.97\sqrt{2}\sin(20\pi t+38^\circ)\ (\text{A})$

[2] 已知在图 3.27 所示 *RLC* 并联电路中 $R=30\Omega$，$L=190\text{mH}$，$C=157\mu\text{F}$，$\dot{V}=20\text{V}$，$f=50\text{Hz}$，试回答下列问题：

(1) 求复数阻抗 Z。

(2) 用复数表示电路的总电流，并求其大小。

答　(1) 先求感抗 X_L、容抗 X_C：

$$X_L=2\pi fL=2\pi\times 50\times 190\times 10^{-3}=60$$

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\pi\times 50\times 157\times 10^{-6}}=20$$

则 $Z=R+j(X_L-X_C)=30+j(60-20)=30+j40\ (\Omega)$

(2) $\dot{I}=\dfrac{\dot{V}}{|Z|}=\dfrac{20}{30+\text{j}40}=\dfrac{20(30-j40)}{(30+j40)(30-j40)}$

$=\dfrac{600-j800}{900+1600}=0.24-j0.32\ (\text{A})$

$I=\sqrt{0.24^2+0.32^2}=0.4\ (\text{A})$

8　谐振电路

要　点

在 RLC 串联电路中，当电源的频率变化时，有一使电流为最大的频率。这个电流最大的状态称为串联谐振，这时的频率 f_s 称为串联谐振频率。f_s 可表示如下：

$$f_s=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\ (\mathrm{Hz})$$

解　释

串联谐振电路

在图 3.29 所示的 RLC 串联电路中，电流随频率 f 的变化如图 3.30 所示。当频率非常低时电流接近于 0，随着频率的增高电流也开始增大，但到某一频率后，电流又开始减小。这是因为，在频率很低时感抗 $X_L=2\pi fL$ 虽然很小，但容抗 $X_C=1/2\pi fC$ 却非常大，故阻抗很大、电流很小。进而，随着频率增高 X_L 增大、X_C 变小，使阻抗变小，故电流增大。在某一频率时 $X_L=X_C$，阻抗仅为 R，故电流变成最大。当频率再继续增高时，阻抗又增大了，电流则减小。

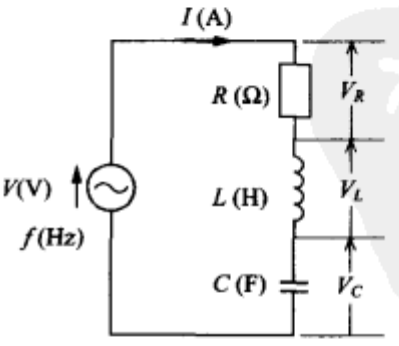


图 3.29　串联谐振电路

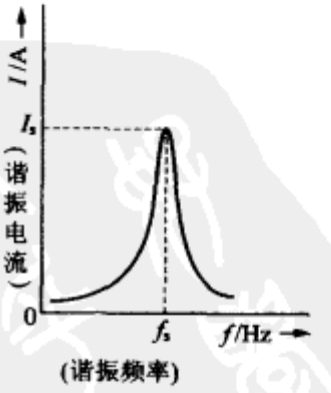


图 3.30　串联谐振曲线

串联谐振
谐振频率

将这种现象称为**串联谐振**，$X_L=X_C$ 时的频率称为**谐振频率**，并将产生这种串联谐振的电路称为串联谐振电路。

谐振频率可如下求得

$$X_L=X_C$$

即

$$2\pi f_s L=\frac{1}{2\pi f_s C},\ f_s^2=\frac{1}{(2\pi)^2 LC}$$

则

$$f_s=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

由于串联谐振时 $\dot{V}_L$ 与 $\dot{V}_C$ 大小相等、相位相反，故电源电压 $\dot{V}$ 等于 $\dot{V}_R$。在这里，将 $\dot{V}_L$ 与 V 之比或 V_C 与 V 之比称为**选择性** Q，如下所示：

选择性

$$Q=\frac{V_L}{V}=\frac{V_C}{V}=\frac{2\pi f_s L}{R}=\frac{1}{2\pi f_s CR}$$

Q 越大，谐振曲线越尖锐，回路的频率选择性越好。

并联谐振电路

当在图 3.31 所示的电路中施加电压 $\dot{V}$ 时，线圈中的电流 $\dot{I}_L$、电容器中的电流 $\dot{I}_C$ 以及总电流 $\dot{I}$ 可表示如下：

$$\dot{I}_L=\frac{\dot{V}}{R+j\omega L}=\dot{V}\left(\frac{R}{R^2+\omega^2L^2}-j\frac{\omega L}{R^2+\omega^2L^2}\right)$$

$$\dot{I}_C=\mathrm{j}\omega C\dot{V}$$

$$\dot{I}=\dot{I}_L+\dot{I}_C=\dot{V}\left[\frac{R}{R^2+\omega^2L^2}+j\left(\omega C-\frac{\omega L}{R^2+\omega^2L^2}\right)\right]$$

上式中当虚部为 0 时，电流 $\dot{I}$ 与电压 $\dot{V}$ 同相，而大小则为最小。称这种现象为**并联谐振**（见图 3.32）。

并联谐振

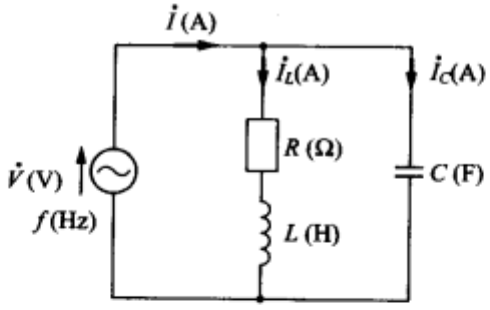


图 3.31 并联谐振电路

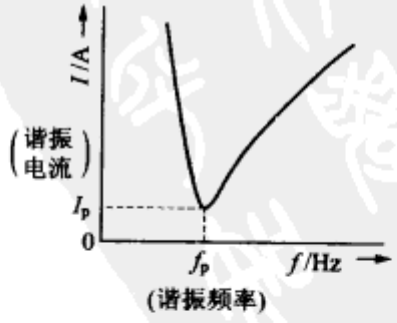


图 3.32 并联谐振曲线

并联谐振频率 f_p 可如下求得

$$2\pi f_p C-\frac{2\pi f_p L}{R^2+(2\pi f_p)^2 L^2}=0$$

$$2\pi f_p=\sqrt{\frac{1}{LC}-\frac{R^2}{L^2}}$$

$$f_p=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}-\frac{R^2}{L^2}}$$

式中，线圈的电阻 R 非常小，当 $\frac{R^2}{L^2}\ll\frac{1}{LC}$ 时可忽略 $\frac{R^2}{L^2}$，因此有

$$f_p=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC}}$$

即与串联谐振频率相同。

例　题

[1] 已知图 3.29 所示串联电路中 $V=100\text{V}$，$R=50\Omega$，$L=10\text{mH}$，$C=2.2\mu\text{F}$，试回答下列各问题：

(1) 求谐振频率 f_s。

(2) 求谐振时的感抗 X_L 与容抗 X_C。

(3) 求谐振时电路中的电流 I 及选择性 Q 的数值。

答　(1) $f_s=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}=\dfrac{1}{2\pi\times\sqrt{10\times10^{-3}\times2.2\times10^{-6}}}=1073\ (\text{Hz})$

(2) 由谐振时的角频率 $\omega_s=2\pi f_s=2\times\pi\times1073=6742(\text{rad/s})$ 可知

$$X_L=\omega_s L=6742\times10\times10^{-3}=67\ (\text{Hz})$$

$$X_C=\frac{1}{\omega_s C}=\frac{1}{6742\times2.2\times10^{-6}}=67\ (\text{Hz})$$

(3) $I=\dfrac{V}{Z}=\dfrac{V}{R}=\dfrac{100}{50}=2\ (\text{A})$

$$Q=\frac{2\pi f_s L}{R}=\frac{2\pi\times1073\times10\times10^{-3}}{50}=1.35$$

9　交流电桥

要　点

交流电桥就是在直流电路的惠斯通电桥中，以阻抗取代其四个边上的电阻，以检测器或受话器取代检流计，从而构成的电路。交流电桥的平衡条件是相对边上复数阻抗的乘积相等。

解　释

交流电桥的工作原理

当图 3.33 所示交流电桥处于平衡状态时，b 点与 d 点之间的电位差为 0，流过检测器 D 的电流为 0。这时有下式成立：

$$\dot{I}_1 Z_1 = \dot{I}_2 Z_2 , \dot{I}_1 Z_4 = \dot{I}_2 Z_3$$

由此，可获得电桥的平衡条件如下：

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4$$

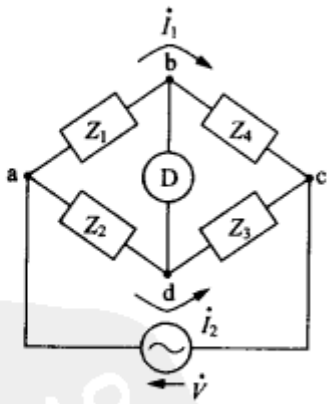


图 3.33　交流电桥

测量未知阻抗

麦克斯韦电桥

图 3.34 所示称为**麦克斯韦电桥**，可用来测量未知的自感 L_x 及其内阻 R_x。今设 P、Q 为已知的电阻值，这时若电桥平衡则有

$$P(R + j\omega L) = Q(R_x + j\omega L_x)$$

等号若成立，必须两边的实部与实部、虚部与虚部分别相等，因此有

$$PR = QR_x , j\omega LP = j\omega L_x Q$$

则　$R_x=\dfrac{P}{Q}R,L_x=\dfrac{P}{Q}L$

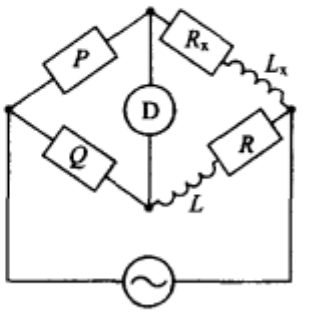


图 3.34　麦克斯韦电桥

例 题

[1] 在图 3.34 所示电路中，当 $P=20\Omega$、$Q=10\Omega$、$R=60\Omega$、$L=4\text{mH}$ 时电桥处于平衡状态。求此时的 R_x、L_x。

答　$R_x=\dfrac{20}{10}\times60=120(\Omega),L_x=\dfrac{20}{10}\times4\times10^{-3}=8\ (\text{mH})$

[2] 试求图 3.35 所示电路的平衡条件。

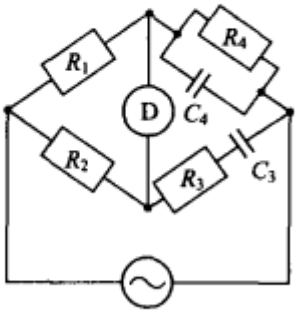


图 3.35　维恩电桥

答　为使电桥平衡，必须令相对边的复数阻抗之积相等，因此有

$$R_1\left(R_3+\frac{1}{j\omega C_3}\right)=R_2\left(\frac{1}{\dfrac{1}{R_4}+j\omega C_4}\right)$$

$$\left(\frac{1}{R_4}+j\omega C_4\right)\left(R_3+\frac{1}{j\omega C_3}\right)=\frac{R_2}{R_1}$$

$$\frac{R_3}{R_4}+\frac{1}{j\omega C_3R_4}+j\omega C_4R_3+\frac{C_4}{C_3}=\frac{R_2}{R_1}$$

由实部相等可得

$$\frac{R_3}{R_4}+\frac{C_4}{C_3}=\frac{R_2}{R_1}$$

由虚部相等可得

$$\frac{1}{C_3R_4}=\omega^2C_4R_3\qquad\text{则 }\omega=\frac{1}{\sqrt{C_3C_4R_3R_4}}$$

这种电桥称为维恩电桥，可用于测量电阻、电容及频率。

10　单相交流电路的功率

要　点

直流电路的功率 P 虽然可由

$$P=VI$$

来求，但对交流则因为存在电压与电流之间还有相位差这种情况，故其计算与直流的算法不同。

假定单相交流电路的电压、电流的有效值分别为 V(V)、I(A)，相位差为 θ(rad)，则其功率 P 为：

$$P=VI\cos\theta \ \text{(W)}$$

解　释

交流电路的功率

在图 3.36 所示电路中，如令电压、电流的有效值分别为 V(V)、I(A)，则瞬时值 v(V)、i(A)可表示如下：

$$v=\sqrt{2}V\sin\omega t$$

$$i=\sqrt{2}I\sin(\omega t-\theta)$$

功率的瞬时值 p，可用 v、i 的乘积表示如下：

$$\begin{aligned}p&=vi=2VI\sin\omega t\sin(\omega t-\theta)\\&=VI\cos\theta-VI\cos(2\omega t-\theta)\end{aligned}$$

交流功率可作为其瞬时功率在 1 周期内的平均值来求得。由此，因为上式中第 2 项 $VI\cos(2\omega t-\theta)$ 在 1 周期内平均值为 0，故交流功率 P 可表示如下：

$$P=VI\cos\theta$$

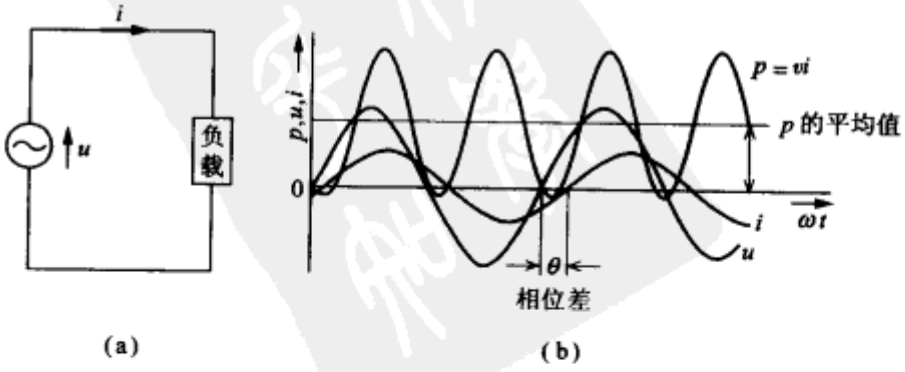


图 3.36　交流电路的功率

纯电阻电路的功率

如图 3.37 所示，在负载仅为电阻的电路中，电压与电流同相，即相位差 $\theta=0$，因此交流功率 P 为：

$$P=VI$$

与直流的情形相同。

纯电容电路的功率

如图 3.38 所示，在负载中没有电阻成分仅有电容的电路中，由于电流的相位超前电压的相位 90°，故交流功率 P 为：

$$P=VI\cos\frac{\pi}{2}=0$$

即在电容器中仅是反复地充、放电，不消耗功率。

纯电感电路的功率

如图 3.39 所示，由于纯电感电路中电流比电压的相位滞后 90°，故 $\cos\theta=0$，与纯电容电路相同不消耗功率。

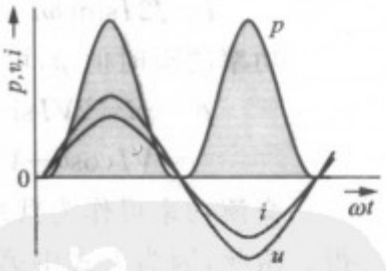


图 3.37　纯 R 电路的功率

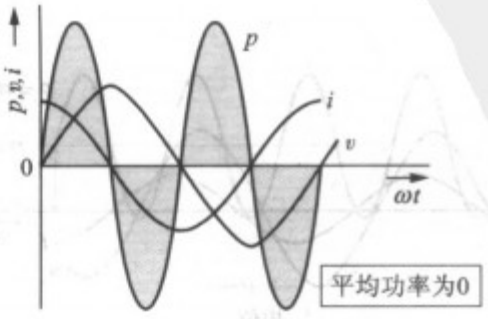


图 3.38　纯 C 电路的功率

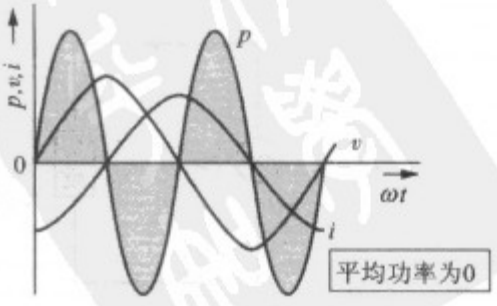


图 3.39　纯 L 电路的功率

视在功率、有功功率、无功功率

交流功率
视在功率

在**交流功率** $P=VI\cos\theta$ 中，将电流与电压的乘积看作表观上的功率，称为**视在功率**。

如将电压加到电阻上，电阻就会消耗功率而发热做功，但对线圈或电容器来说却仅为暂时将功率储存，随后又立即送回电源，因此是在电源与线圈或电容器之间仅仅进行功率的往复交换，并不做功。前者所做功的功率称为**有功功率**，后者没有做功而仅往复交换的功率称为**无功功率**。一般为简便起见，称功率即指有功功率。

有功功率
无功功率

视在功率与有功功率、无功功率之间具有图 3.40 所示直角三角形的关系，如下式所示：

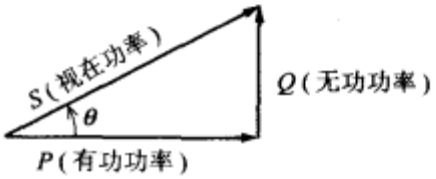


图 3.40　功率的直角三角形

$$Q=VI\sin\theta\ (\text{var})$$

$$S=\sqrt{P^2+Q^2}=VI\ (\text{V}\cdot\text{A})$$

功率因数

功率因数

在视在功率中作为有功功率来使用的部分所占的比率称为**功率因数**，如下式所示：

$$\text{功率因数}=\frac{VI\cos\theta}{VI}=\cos\theta$$

即功率因数等于 $\cos\theta$，由于其数值为 0～1，故多用百分数(%)来表示。

例　题

[1] 试求功率因数为 80%、消耗的功率为 140kW 的负载的视在功率和无功功率。

答　视在功率 $S=\dfrac{VI\cos\theta}{\cos\theta}=\dfrac{140}{0.8}=175\ (\text{kV}\cdot\text{A})$

无功功率 $Q=\sqrt{S^2-P^2}=\sqrt{175^2-140^2}=105\ (\text{kvar})$

[2] 试求图 3.41 所示电路中，当 $R=9\Omega$、$X_L=20\Omega$、$X_C=8\Omega$、$V=100\text{V}$ 时的视在功率 S、功率因数 $\cos\theta$、功率 P。

答　阻抗 $|Z|=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}$

$=\sqrt{9^2+(20-8)^2}=15$（Ω）

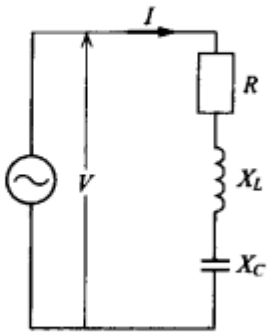


图 3.41

电流 $I=\dfrac{V}{Z}=\dfrac{100}{15}=6.67$（A）

则 $S=VI=100\times6.67=667$（V·A）

$\cos\theta=\dfrac{R}{Z}=\dfrac{9}{15}=0.6$

$P=VI\cos\theta=100\times6.67\times0.6=400$（W）

11　三相交流的产生与表示方法

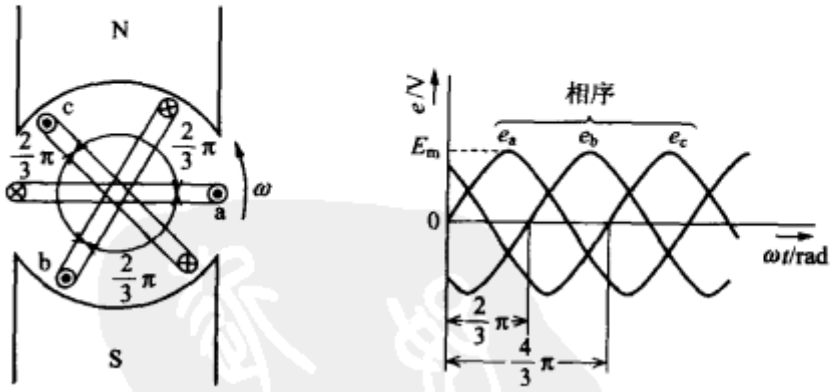
要　点

三相交流是由同一频率但相位不同的三个单相交流作为1组构成的交流，具有能够经济地输送大功率电能等优点。人们将大小相等、相位互差$\frac{2}{3}\pi$(rad)的三相交流称为对称三相交流。

解　释

三相交流的产生

如图3.42(a)所示，在均匀磁场中放入3组一样的线圈a、b、c，使之互成$\frac{2}{3}\pi$的间隔，并以角速度ω(rad/s)逆时针方向旋转，则在各线圈中产生如图3.42(b)所示的大小相等、相位互差$\frac{2}{3}\pi$(rad)的正弦交流电动势。



(a) 3组线圈产生的电动势　　(b) 对称三相交流波形

图3.42　三相交流的产生

三相交流的相序

令3组线圈中产生的电动势分别为e_a(V)、e_b(V)、e_c(V)，则各相的电动势按$e_a \rightarrow e_b \rightarrow e_c$的顺序成为最大。即各相的电动势的相位是按a→b→c的顺序一个比一个滞后$\frac{2}{3}\pi$(rad)。这种相位的顺序称为**相序**或相旋转。

相序

三相交流的表示方法

图 3.42 所示各相产生的电动势的瞬时值若以 E_m 为最大值、E 为有效值时，可表示如下：

$$\left.\begin{aligned} e_a &= E_m \sin\omega t = \sqrt{2}E\sin\omega t \\ e_b &= E_m \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) = \sqrt{2}E\sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \\ e_c &= E_m \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) = \sqrt{2}E\sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) \end{aligned}\right\} \tag{3.5}$$

三相交流电动势

式(3.5)所表示的**三相交流电动势**的瞬时值可用相量表示，如图 3.43 所示。

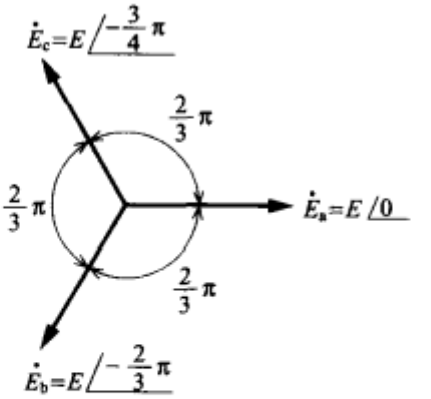


图 3.43　对称三相交流电动势的相量图

对称三相交流之和

图 3.44 表示对称三相交流电动势之和的相量图。还可按下列所示求其各瞬时值之和：

$$\begin{aligned} e_a + e_b + e_c &= \sqrt{2}E\left[\sin\omega t + \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right)\right. \\ &\quad \left. + \left(\sin\omega t - \frac{4}{3}\pi\right)\right] \\ &= \sqrt{2}E\left[\sin\omega t + \left(\sin\omega t\cos\frac{2}{3}\pi\right.\right. \\ &\quad \left.\left. - \sin\frac{2}{3}\pi\cos\omega t + \sin\omega t\cos\frac{4}{3}\pi\right.\right. \end{aligned}$$

$$-\sin\frac{4}{3}\pi\cos\omega t\Big)\Big]$$

$$=\sqrt{2}E(\sin\omega t-\sin\omega t)=0$$

由相量图和上式可知，对称三相交流电动势的各瞬时值之和与时间无关，为0。

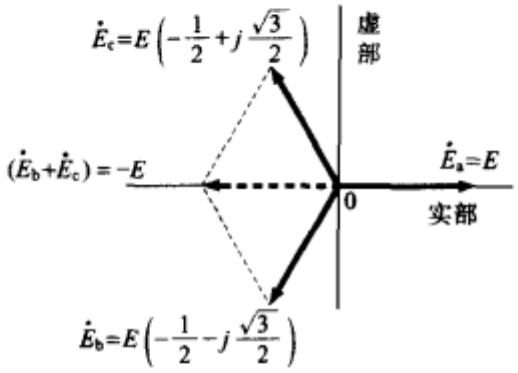


图 3.44　对称三相交流电动势之和

例　题

1　图3.45表示一种三相交流电压的波形。设各电压的角频率为20π (rad/s)，试回答下列问题：

(1) 将各电压以瞬时值 v_a、v_b、v_c 表示；

(2) 将各电压 $\dot{V}_a$、$\dot{V}_b$、$\dot{V}_c$ 用复数表示。

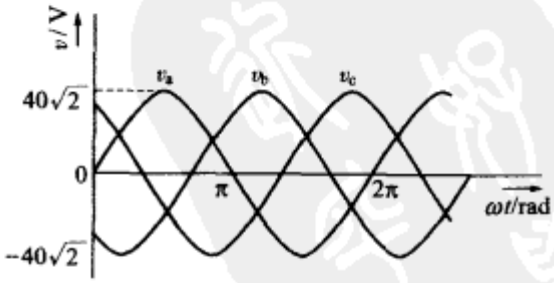


图 3.45　例题1图

答　(1) 由图3.45可知，此三相电压的最大值为 $40\sqrt{2}$(V)，v_a 的初相角为0(rad)，v_b 的初相角为 $-\frac{2}{3}\pi$(rad)，v_c 的初相角为 $-\frac{4}{3}\pi$(rad)，因此各电压的瞬时值为

$$v_a=40\sqrt{2}\sin20\pi t\ \text{(V)}$$

$$v_b = 40\sqrt{2}\sin\left(20\pi t - \frac{2}{3}\pi\right)\ (\mathrm{V})$$

$$v_c = 40\sqrt{2}\sin\left(20\pi t - \frac{4}{3}\pi\right)\ (\mathrm{V})$$

(2) 因电压的有效值 $V=40\mathrm{V}$，故

$$\dot{V}_a = 40\cos 0 + j40\sin 0 = 40\ (\mathrm{V})$$

$$\dot{V}_b = 40\cos\left(-\frac{2}{3}\pi\right) + j40\sin\left(-\frac{2}{3}\pi\right) = -20 - j34.6\ (\mathrm{V})$$

$$\dot{V}_c = 40\cos\left(-\frac{4}{3}\pi\right) + j40\sin\left(-\frac{4}{3}\pi\right) = -20 + j34.6\ (\mathrm{V})$$

相量图如图 3.46 所示。

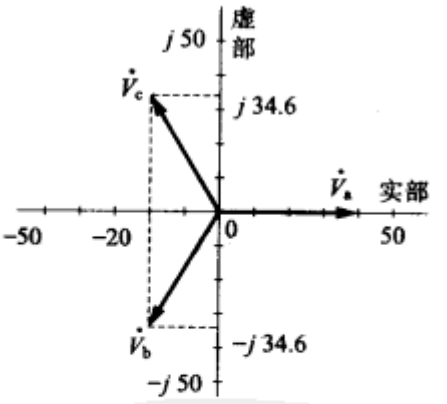


图 3.46　图 3.45 所示电压的相量图

12　三相连接的种类

要　点

三相电路的连接方法当中，广泛使用Y形连接（星形连接）、△形连接（三角形连接）、V形连接。

Y形连接：

（1）线电压大小是相电压大小的$\sqrt{3}$倍，其相位超前相应相电压$\pi/6$(rad)。

（2）线电流与相电流相等。

△形连接：

（1）线电压与相电压相等。

（2）线电流的大小是相电流大小的$\sqrt{3}$倍，其相位滞后相应相电流$\pi/6$(rad)。

Y形连接

如图3.47所示，将产生三相电动势的三个绕组的一端连接在一起，将其余三端引向外部作为输出端子，这种连接就是Y形连接。此时，将公共连接点O的电位作为基准，称各相绕组自身产生的电压$\dot{E}_a$、$\dot{E}_b$、$\dot{E}_c$为相电压，外部端子间的电压$\dot{V}_{ab}$、$\dot{V}_{bc}$、$\dot{V}_{ca}$为线电压。

若以$\dot{E}_a$为基准，则各线电压可表示如下：

$$\dot{V}_{ab}=\dot{E}_a-\dot{E}_b=E-E\left(-\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$=E\left(\frac{3}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)=\sqrt{3}E\left(\frac{\sqrt{3}}{2}+j\frac{1}{2}\right)$$

$$=\sqrt{3}E\angle\frac{\pi}{6}$$

同理有

$$\dot{V}_{bc}=\dot{E}_c-\dot{E}_a=\sqrt{3}E\angle-\frac{\pi}{2}=\sqrt{3}E\angle-\frac{2}{3}\pi+\frac{\pi}{6}$$

$$\dot{V}_{ca}=\dot{E}_c-\dot{E}_a=\sqrt{3}E\angle-\frac{7}{6}\pi=\sqrt{3}E\angle-\frac{4}{3}\pi+\frac{\pi}{6}$$

即Y形连接时线电压的大小为相电压大小的$\sqrt{3}$倍，$\dot{V}_{ab}$、$\dot{V}_{bc}$、$\dot{V}_{ca}$的相位分别超前各相应相电压$\dot{E}_a$、$\dot{E}_b$、$\dot{E}_c$以$\frac{\pi}{6}$，此关系如图 3.48 所示。

此外，当将Y形连接的电源与负载相连接时，各相中所流过的电流（相电流）就是向外部流出的电流（线电流）。换言之，Y形连接时相电流与线电流相等。

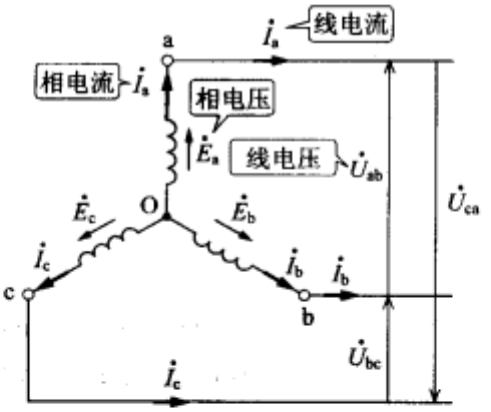


图 3.47　三相Y形连接

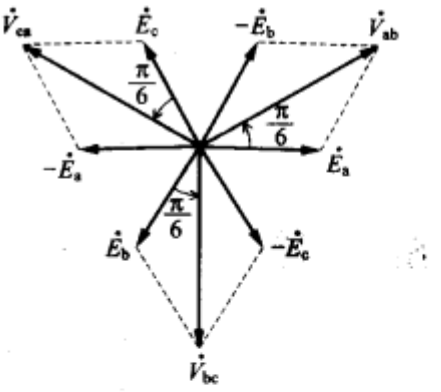


图 3.48　Y形连接时相电压与线电压之间的关系

△形连接

如图 3.49 所示将各绕组依次相连，各相绕组是作为三角形的一个边接成闭合回路，再由各个连接点向外引出导线，这种连接方式称为△形连接。此时，因各相绕组都分别直接与外部导线相连，故相电压$\dot{E}_a$、$\dot{E}_b$、$\dot{E}_c$分别与线电压$\dot{V}_{ab}$、$\dot{V}_{bc}$、$\dot{V}_{ca}$相等。

其次，来看相电流$\dot{I}_{ab}$、$\dot{I}_{bc}$、$\dot{I}_{ca}$与线电流$\dot{I}_a$、$\dot{I}_b$、$\dot{I}_c$之间的关系。因在 a、b、c 各点适用基尔霍夫定律，故若以$\dot{I}_{ab}$为基准则有

$$\dot{I}_a=\dot{I}_{ab}-\dot{I}_{ca}=I-I\left(-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$=I\left(\frac{3}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)=\sqrt{3}I\left(\frac{\sqrt{3}}{2}-j\frac{1}{2}\right)$$

$$=\sqrt{3}I\angle-\frac{\pi}{6}$$

同理有

$$\dot{I}_b=\dot{I}_{bc}-\dot{I}_{ab}=\sqrt{3}I\angle-\frac{5}{6}\pi=\sqrt{3}I\angle-\frac{2}{3}\pi-\frac{\pi}{6}$$

$$\dot{I}_c=\dot{I}_{ca}-\dot{I}_{bc}=\sqrt{3}I\angle-\frac{3}{2}\pi=\sqrt{3}I\angle-\frac{4}{3}\pi-\frac{\pi}{6}$$

即△形连接时线电流的大小为相电流大小的$\sqrt{3}$倍，而$\dot{I}_a$、$\dot{I}_b$、$\dot{I}_c$的相位则分别滞后$\dot{I}_{ab}$、$\dot{I}_{bc}$、$\dot{I}_{ca}$以$\frac{\pi}{6}$（见图 3.50）。

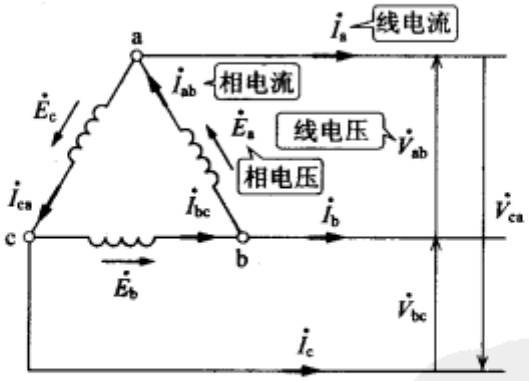


图 3.49　三相△形连接

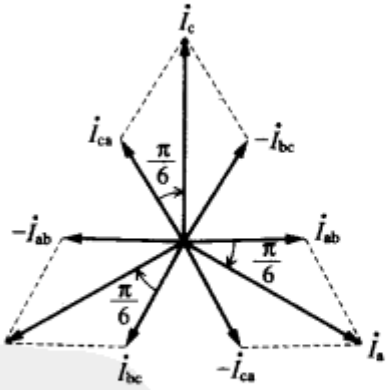


图 3.50　△形连接时相电流与线电流之间的关系

V 形连接

这是对△形连接电源的一相由于故障等原因将其去掉的连接形式，用其所余二相向三相负载供给电能。如图 3.51 所示将 c 相去掉成为 V 形连接时，$\dot{V}_{ab}$、$\dot{V}_{bc}$与△形连接时同样，与相电压相等，且有$\dot{V}_{ca}=-C(\dot{E}_{ab}+\dot{E}_{bc})$关系。这样，也得到了与$\dot{V}_{ab}$、$\dot{V}_{bc}$大小相等、相位分别差$\frac{2}{3}\pi$(rad)的 c 相电压$\dot{V}_{ca}$（见图 3.52），可作为对称三相电路来使用，因此常利用两台变压器作为三相交流电源使用。

其次，来看V形连接时电源的相电流与线电流。由图3.51可知，电流是按$\dot{I}_{ab}=\dot{I}_a$，$\dot{I}_{bc}=-\dot{I}_c$的关系而流动。这样，在V形连接的电源中相电流就等于线电流。

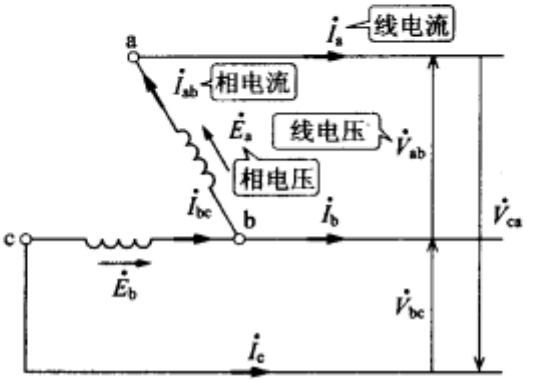
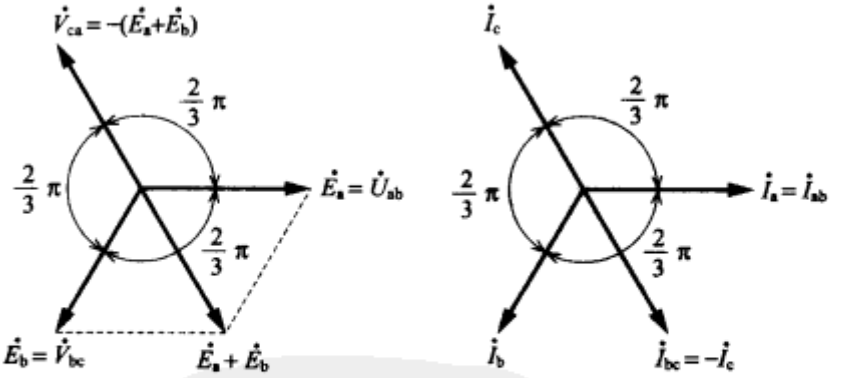


图3.51　三相V形连接



(a) 相电压与线电压的关系　　(b) 相电流与线电流的关系

图3.52　V形连接的相量图

例　题

[1] 在△形连接的对称三相负载上，施加线电压为200V的对称三相交流电压时，线电流为15A。试求负载的相电流和负载阻抗的大小。

答 在△形连接时线电流的大小是相电流大小的$\sqrt{3}$倍，线电压等于相电压，因此相电流I_p、阻抗Z可求出如下：

$$I_p=\frac{15}{\sqrt{3}}=8.66\ (\mathrm{A})$$

$$Z=\frac{E_p}{I_p}=\frac{200}{8.66}=23.09\ (\Omega)$$

13　三相交流电路的计算

要　点

对于对称三相电路，其一相的电流、电压可按与单相电路相同的方法计算，其他两相只要将所求结果的相位再互错$\frac{2}{3}\pi$(rad)的相位就行。

解　释

对称三相电路

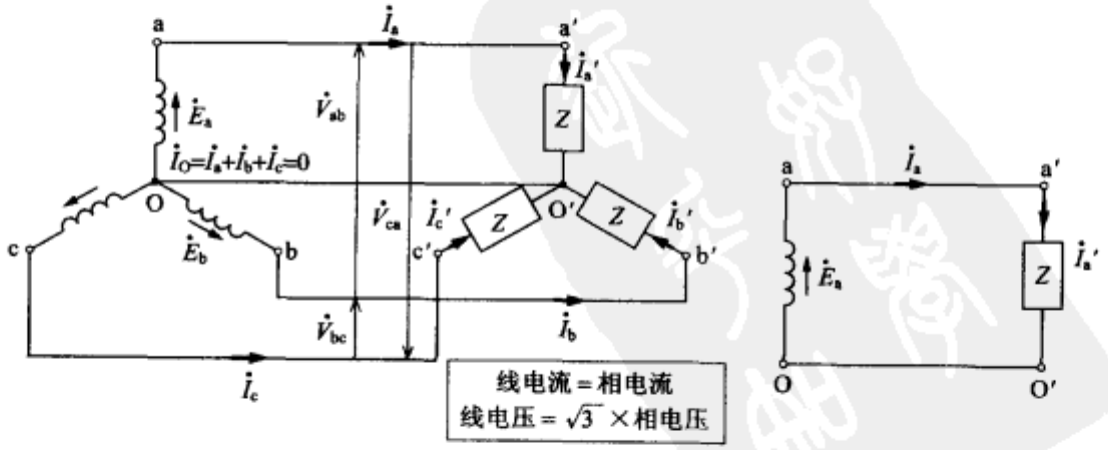
将相等的三个负载以Y形连接或△形连接起来，称为**对称三相负载**。将对称三相负载与**对称三相电源**连接起来的电路，称为**对称三相电路**。在对称三相电路中，根据电源与负载的连接方式可有Y-Y、△-△、Y-△、△-Y等形式。

对称三相负载
对称三相电源
对称三相电路

Y-Y连接电路

如图3.53(a)所示，电源、负载一起以Y形连接构成的电路，称为Y-Y连接电路。称各相的公共点O、O′为**中点**，而中点的连线则称为**中线**。在对称三相电路中，中线上所流电流$\dot{I}_O=\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c=0$，因此可以省略中线。对于这种电路，可如图3.53(b)所示取出其一相作为单相电路来处理，求取其相电流(等于线电流)。

中点
中线



(a) 电路图　　(b) 一相的部分

图3.53　Y-Y连接电路

在图 3.53 所示电路中，如设对称三相负载为 $Z=|Z|\angle\theta$ 时，则在各负载中的电流为

$$\dot{I}_a=\frac{\dot{E}_a}{Z}=\frac{E\angle 0}{|Z|\angle\theta}=\frac{E}{Z}\angle\theta$$

$$\dot{I}_b=\frac{\dot{E}_b}{Z}=\frac{E\angle-\frac{2}{3}\pi}{|Z|\angle\theta}=\frac{E}{|Z|}\angle-\frac{2}{3}\pi-\theta$$

$$\dot{I}_c=\frac{\dot{E}_c}{Z}=\frac{E\angle-\frac{4}{3}\pi}{|Z|\angle=\theta}=\frac{E}{|Z|}\angle-\frac{4}{3}\pi-\theta$$

可见，它是大小相等为 $E/|Z|$(A)、相位互差 $\frac{2}{3}\pi$(rad) 的对称三相交流电流。图 3.54 表示此电路的相量图。再有，由于各线电压的大小是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍，相位则超前 $\pi/6$，故线电压与线电流的相位差是 $(\pi/6+\theta)$(rad)。

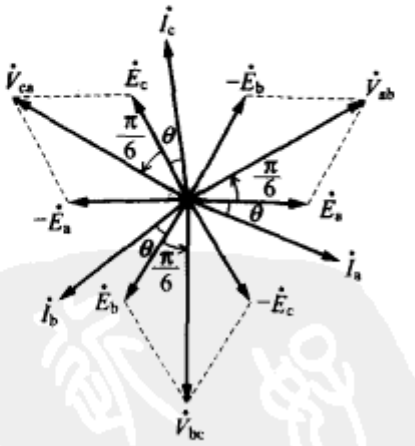


图 3.54　Y-Y连接电路的相量图

△-△连接电路

如图 3.55 所示，电源、负载一起以△形连接构成的电路称为△-△连接电路。这种连接时，电源的相电压等于线电压，直接施加到负载上。因此，负载中的各相电流 $\dot{I}'_{ab}$、$\dot{I}'_{bc}$、$\dot{I}'_{ca}$ 如下所示：

$$\dot{I}'_{ab}=\frac{\dot{E}_{ab}}{Z}=\frac{E\angle 0}{|Z|\angle\theta}=\frac{E}{Z}\angle -\theta$$

$$\dot{I}'_{bc}=\frac{\dot{E}_{bc}}{Z}=\frac{E\angle -\frac{2}{3}\pi}{|Z|\angle\theta}=\frac{E}{|Z|}\angle -\frac{2}{3}\pi-\theta$$

$$\dot{I}'_{ca}=\frac{\dot{E}_{ca}}{Z}=\frac{E\angle -\frac{4}{3}\pi}{|Z|\angle\theta}=\frac{E}{|Z|}\angle -\frac{4}{3}\pi-\theta$$

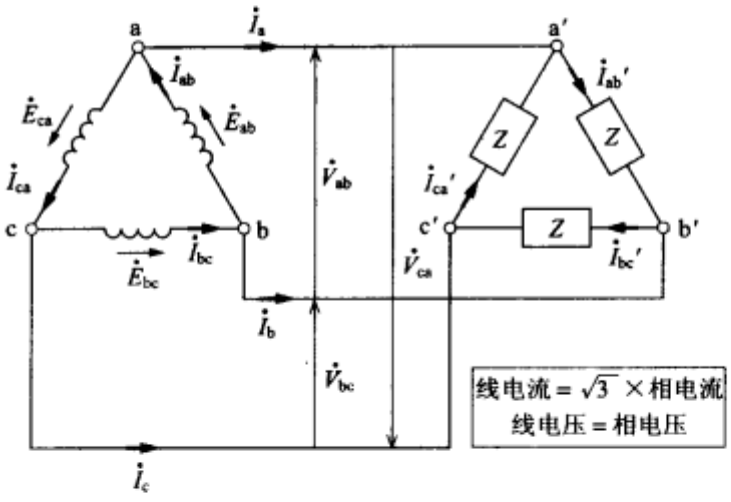


图 3.55　△-△连接电路

这里如令相电流的大小 $E/|Z|=I_p$，则作为在 a′点流动的电流，相电流 $\dot{I}'_{ca}$、$\dot{I}'_{bc}$ 与线电流 $\dot{I}_a$ 之间具有下列关系：

$$\dot{I}'_a=\dot{I}'_{ab}-\dot{I}'_{ca}=\sqrt{3}I_p\angle -\frac{\pi}{6}-\theta$$

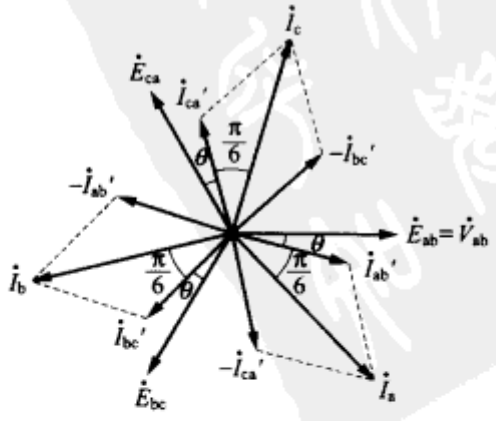


图 3.56　△-△连接电路的相量图

同理有

$$\dot{I}'_b=\dot{I}'_{bc}-\dot{I}'_{cb}=\sqrt{3}I_p\angle-\frac{5}{6}\pi-\theta$$

$$\dot{I}'_c=\dot{I}'_{ca}-\dot{I}'_{bc}=\sqrt{3}I_p\angle-\frac{3}{2}\pi-\theta$$

图3.56表示此电路的相量图。△-△连接电路与Y-Y连接电路同样，线电压与线电流的相位差也是$(\pi/6+\theta)$(rad)。

V-△连接电路

在V形连接的电源中，由于线电压$\dot{V}_{ab}$、$\dot{V}_{bc}$、$\dot{V}_{ca}$具有与相电压大小相等的对称三相电压的作用，故负载的相电流$\dot{I}'_{ab}$、$\dot{I}'_{bc}$、$\dot{I}'_{ca}$与线电流$\dot{I}_a$、$\dot{I}_b$、$\dot{I}_c$也是对称三相电流，可以按与△-△连接电路相同的方法来计算。

在图3.57中有

$$\dot{E}_{ab}=Z\dot{I}'_{ab},\dot{E}_{bc}=Z\dot{I}'_{bc},-(\dot{E}_{ab}+\dot{E}_{bc})=\dot{E}_{ca}=Z\dot{I}'_{ca}$$

式中，负载阻抗$Z=|Z|\angle-\theta(\Omega)$，若令$|Z|=\sqrt{R^2+X^2}$，$\theta=\arctan\frac{X}{R}$，则负载的相电流为

$$\dot{I}'_{ab}=\frac{\dot{E}_{ab}}{Z}=\frac{|E|\angle0}{|Z|\angle-\theta}=\frac{E}{|Z|}\angle-\theta\,(\mathrm{A})$$

$$\dot{I}'_{bc}=\frac{\dot{E}_{bc}}{Z}=\frac{E\angle-\frac{2}{3}\pi}{Z\angle-\theta}=\frac{E}{|Z|}\angle-\frac{2}{3}\pi-\theta\,(\mathrm{A})$$

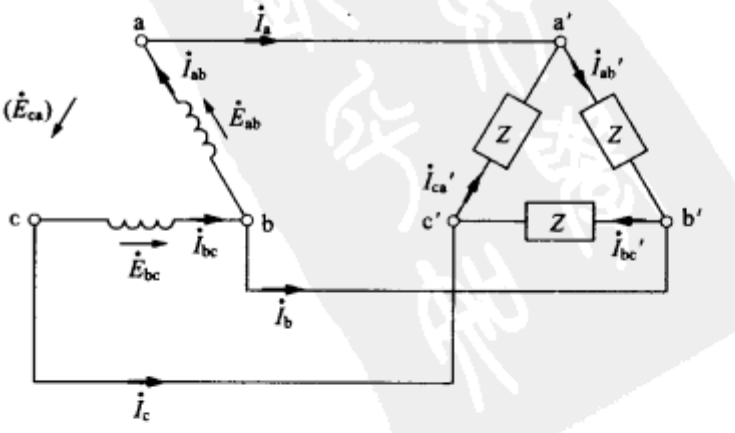


图3.57　V-△连接电路

$$\dot{I}'_{ca}=\frac{\dot{E}_{ca}}{Z}=\frac{E\angle-\frac{4}{3}\pi}{Z\angle-\theta}=\frac{E}{Z}\angle-\frac{4}{3}\pi-\theta\ (\mathrm{A})$$

而线电流则为

$$\dot{I}_a=\dot{I}'_{ab}-\dot{I}'_{ca},\dot{I}_b=\dot{I}'_{bc}-\dot{I}'_{ab},\dot{I}_c=\dot{I}'_{ca}-\dot{I}'_{bc}$$

因此，$\dot{I}_a$、$\dot{I}_b$、$\dot{I}_c$比$\dot{I}'_{ab}$、$\dot{I}'_{bc}$、$\dot{I}'_{ca}$分别滞后 π/6，而大小则是其$\sqrt{3}$倍。

电源的相电流$\dot{I}_{ab}$、$\dot{I}_{bc}$与线电流的关系由图可知为

$$\dot{I}_a=\dot{I}_{ab},\dot{I}_c=-\dot{I}_{bc},\dot{I}_b=\dot{I}_{bc}-\dot{I}_{ab}=-(\dot{I}_c-\dot{I}_a)$$

将这些关系表示成相量图，则如图 3.58 所示。

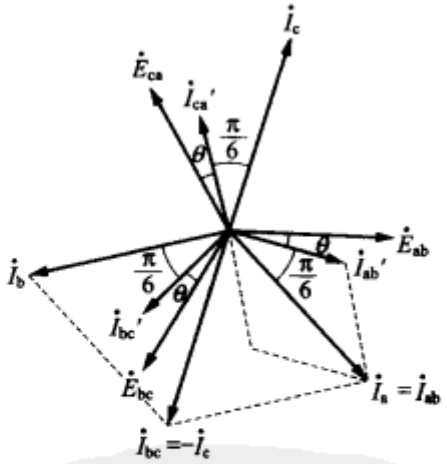


图 3.58　V-△连接电路的相量图

因此，在电源为△形连接时，电源内流动的电流大小是线电流的$1/\sqrt{3}$倍，而在电源变成 V 形连接时，则会有相同的情况出现。

例　题

[1] 已知在图 3.57 所示的电路中线电压为 150V，各相阻抗为 $Z=10\angle\frac{\pi}{6}(\Omega)$，求三相负载的相电流$\dot{I}'_{ab}$、$\dot{I}'_{bc}$、$\dot{I}'_{ca}$及线电流$\dot{I}_a$、$\dot{I}_b$、$\dot{I}_c$。

答　由负载侧看过来可将电源作为对称三相电源来考虑，因此若以线电压$\dot{E}_{ab}$为基准，则各相电流、线电流为

$$\dot{I}'_{ab}=\frac{\dot{E}_{ab}}{Z}=\frac{150\angle 0}{10\angle\frac{\pi}{6}}=15\angle-\frac{\pi}{6}\ (\mathrm{A})$$

$$\dot{I}'_{bc}=\frac{\dot{E}_{bc}}{Z}=\frac{150\angle-\frac{2}{3}\pi}{10\angle\frac{\pi}{6}}=15\angle-\frac{5}{6}\pi\ (\mathrm{A})$$

$$\dot{I}'_{ca}=\frac{\dot{E}_{ca}}{Z}=\frac{150\angle-\frac{4}{3}\pi}{10\angle\frac{\pi}{6}}=15\angle-\frac{3}{2}\pi\ (\mathrm{A})$$

$$\dot{I}_a=\sqrt{3}\dot{I}'_{ab}\angle-\frac{\pi}{6}=15\sqrt{3}\angle-\left(\frac{\pi}{6}+\frac{\pi}{6}\right)$$

$$=25.98\angle-\frac{\pi}{3}\ (\mathrm{A})$$

$$\dot{I}_b=\dot{I}_a\angle-\frac{2}{3}\pi=25.98\angle-\pi\ (\mathrm{A})$$

$$\dot{I}_c=\dot{I}_b\angle-\frac{2}{3}\pi=25.98\angle-\frac{5}{3}\pi\ (\mathrm{A})$$

图 3.59 表示其相量图。

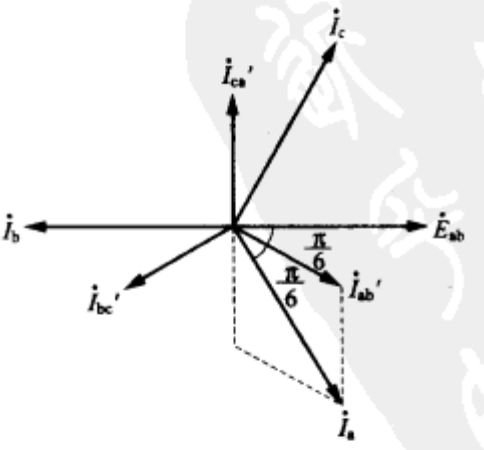


图 3.59　例题 1 所求各量的相量图

14　电源与负载连接方法不同的三相电路

要　点

在电源的连接方法与负载的连接方法不同时，可将电源或负载的连接形式作等效变换，使两者具有相同的形式，然后按Y-Y连接电路、△-△连接电路同样处理，可使计算简便。

解　释

Y形连接负载与△形连接负载的变换

图 3.60 所示电路的 ab 间、a′b′间的阻抗 Z_{ab}、$Z_{a'b'}$ 为：

$$Z_{ab}=Z_Y+Z_Y=2Z_Y$$

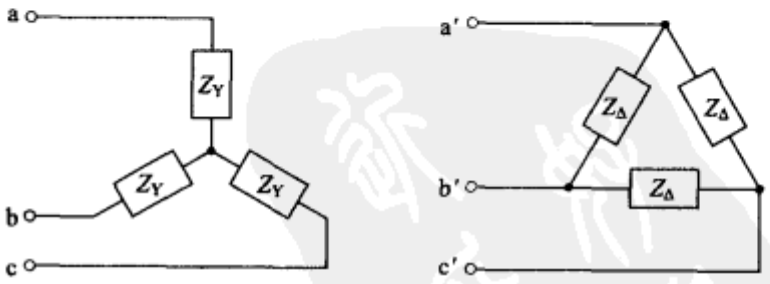
$$Z_{a'b'}=\frac{Z_\triangle(Z_\triangle+Z_\triangle)}{Z_\triangle+(Z_\triangle+Z_\triangle)}=\frac{2}{3}Z_\triangle$$

△形连接负载
Y形连接负载

为使**Y形连接负载**与**△形连接负载**等效，必须使对应 2 个端子间的阻抗相等，因此有

$$2Z_Y=\frac{2}{3}Z_\triangle$$

$$Z_Y=\frac{1}{3}Z_\triangle \quad 或 \quad Z_\triangle=3Z_Y$$



(a) Y形连接负载　　(b) △形连接负载

图 3.60　Y形连接负载与△形连接负载

由此可知，如图 3.61 所示，当把Y形连接负载变换成△形连接负载时要将各相阻抗 变至原来的 3 倍；相反，在将△形连接负载变换成Y形连接负载时则要将各相阻抗变到原来的 1/3 倍。

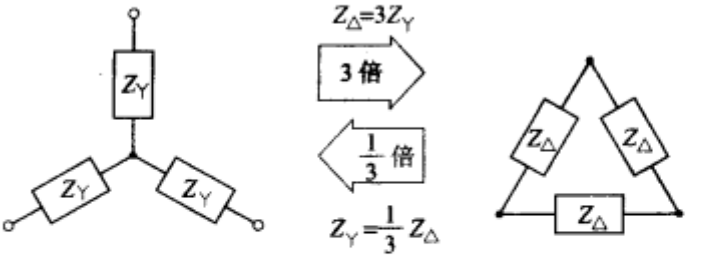


图 3.61　对称三相负载的变换

电源的Y-△变换

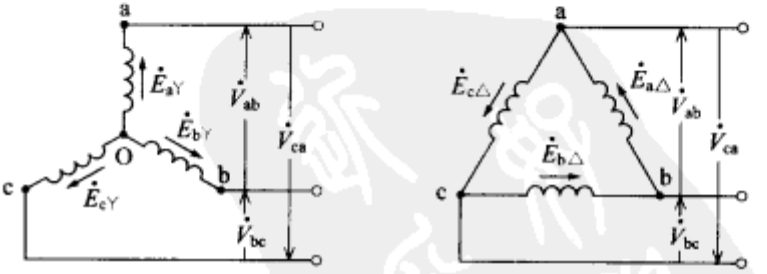
△形连接电路
Y形连接电路

为了把Y形连接的电源变换成与之等效的**△形连接电源**，只要使变换后的△形连接电源与变换前的**Y形连接电源**的各线电压相等就行。由于△形连接的相电压与线电压相等，故图 3.62 中所示△形连接电源的相电压$\dot{E}_{a\triangle}$、$\dot{E}_{b\triangle}$、$\dot{E}_{c\triangle}$如下式所示：

$$\dot{E}_{a\triangle}=\dot{V}_{ab}=\sqrt{3}E_{aY}\angle\frac{\pi}{6}$$

$$\dot{E}_{b\triangle}=\dot{V}_{bc}=\sqrt{3}E_{bY}\angle\frac{\pi}{6}$$

$$\dot{E}_{c\triangle}=\dot{V}_{ca}=\sqrt{3}E_{cY}\angle\frac{\pi}{6}$$



(a) Y形连接电源　　(b) △形连接电源

图 3.62　电源的Y-△变换

例　题

【1】 在图 3.63(a)所示电路中，相电压为 200V 的△形连接电源与$|Z|=5\sqrt{3}+j5(\Omega)$的Y形连接负载相连，求线电流$\dot{I}_a$、$\dot{I}_b$、$\dot{I}_c$，并以相量图表示。

答　为解出此例题，可考虑使用以下常用的两种方法。

(1) 如图 3.64 所示，将对称的△形连接电源等效变换成大小为原来 $1/\sqrt{3}$

倍、相位滞后 π/6(rad)的对称Y形电源，使之成为Y-Y连接电路来处理。

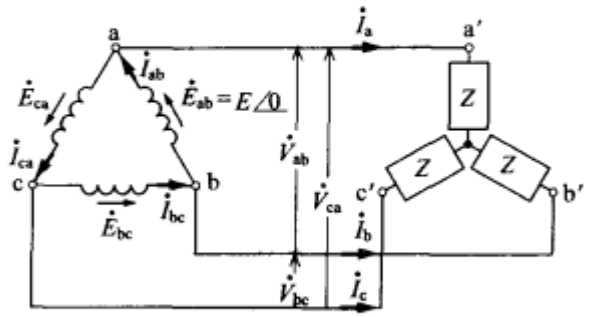


图 3.63　△-Y连接电路

此时，负载阻抗为

$$|Z|=\sqrt{(5\sqrt{3})^2+5^2}=10\ (\Omega)$$

$$\theta=\arctan\left(\frac{5}{5\sqrt{3}}\right)=\frac{\pi}{3}\ (\text{rad})$$

$$Z=10\angle\frac{\pi}{3}\ (\Omega)$$

因此，各线电流如下所示：

$$\dot{I}_a=\frac{\dot{E}_a}{Z}=\frac{\frac{E}{\sqrt{3}}\angle-\frac{\pi}{6}}{|Z|\angle\theta}=\frac{\frac{200}{\sqrt{3}}\angle-\frac{\pi}{6}}{10\angle\frac{\pi}{3}}=\frac{20\sqrt{3}}{3}\angle-\frac{\pi}{2}\ (\text{A})$$

$$\dot{I}_b=\frac{20}{\sqrt{3}}\angle-\frac{\pi}{2}-\frac{2}{3}\pi=\frac{20\sqrt{3}}{3}\angle-\frac{7}{6}\pi\ (\text{A})$$

$$\dot{I}_c=\frac{20}{\sqrt{3}}\angle-\frac{\pi}{2}-\frac{4}{3}\pi=\frac{20\sqrt{3}}{3}\angle-\frac{11}{6}\pi\ (\text{A})$$

其相量图见图 3.65。

(2) 如图 3.66 所示，也可将Y形连接负载 Z 变换成原来的 3 倍构成△形连接负载，使之成为△-△连接电路来处理。

此时，负载阻抗为

$$Z'=3Z=30\angle\frac{\pi}{3}\ (\Omega)$$

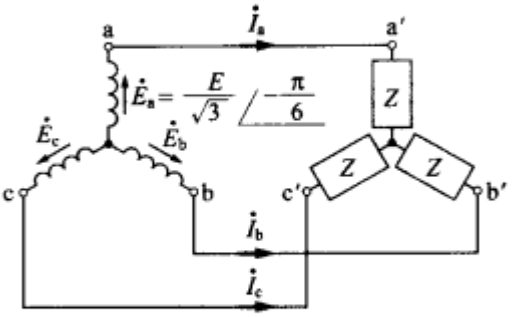


图 3.64　电源变换(△→Y)

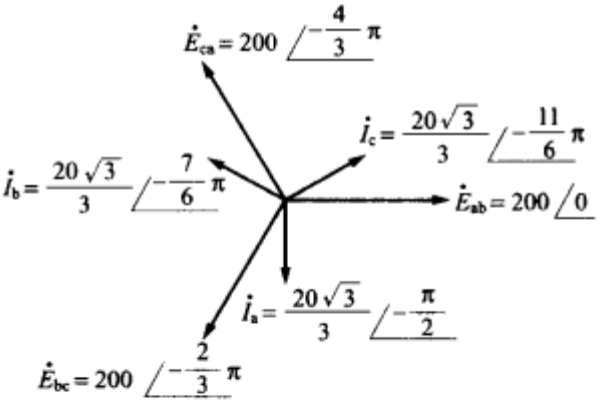


图 3.65　例题 1 的相量图

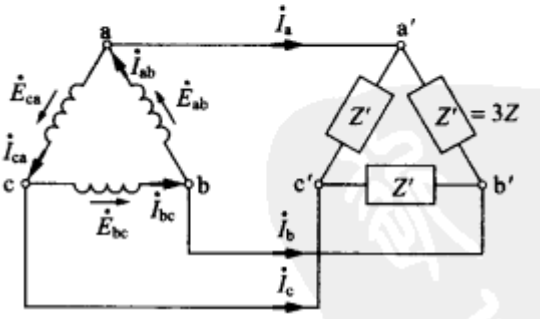


图 3.66　负载变换(Y→△)

再有，因在△形连接电源中相电压＝线电压，故电源的各相电流如下：

$$\dot{I}_{ab}=\frac{\dot{E}_{ab}}{Z'}=\frac{200\angle 0}{30\angle\frac{\pi}{3}}=\frac{20}{3}\angle-\frac{\pi}{3}$$

$$\dot{I}_{bc}=\frac{\dot{E}_{bc}}{Z'}=\frac{200\angle-\frac{2}{3}\pi}{30\angle\frac{\pi}{3}}=\frac{20}{3}\angle-\pi$$

$$\dot{I}_{ca}=\frac{\dot{E}_{ca}}{Z'}=\frac{200\angle-\frac{4}{3}\pi}{30\angle\frac{\pi}{3}}=\frac{20}{3}\angle-\frac{5}{3}\pi$$

在△形连接中，线电流的大小是相电流的$\sqrt{3}$倍，相位分别滞后 π/6，因此各线电流为

$$\dot{I}_{a}=\dot{I}_{ab}\times\sqrt{3}\angle-\frac{\pi}{6}=\frac{20\sqrt{3}}{3}\angle-\frac{\pi}{2}\ (\mathrm{A})$$

$$\dot{I}_{b}=\dot{I}_{bc}\times\sqrt{3}\angle-\frac{\pi}{6}=\frac{20\sqrt{3}}{3}\angle-\frac{7}{6}\pi\ (\mathrm{A})$$

$$\dot{I}_{c}=\dot{I}_{ca}\times\sqrt{3}\angle-\frac{\pi}{6}=\frac{20\sqrt{3}}{3}\angle-\frac{11}{6}\pi\ (\mathrm{A})$$

15　三相交流电路的功率

要　点

三相功率可由各相功率之和求得，设线电压为 V(V)、线电流为 I(A)、负载功率因数为 $\cos\theta$，则与电源或负载是Y形连接、△形连接无关，三相功率为

$$P=\sqrt{3}VI\cos\theta \ (\mathrm{W})$$

解　释

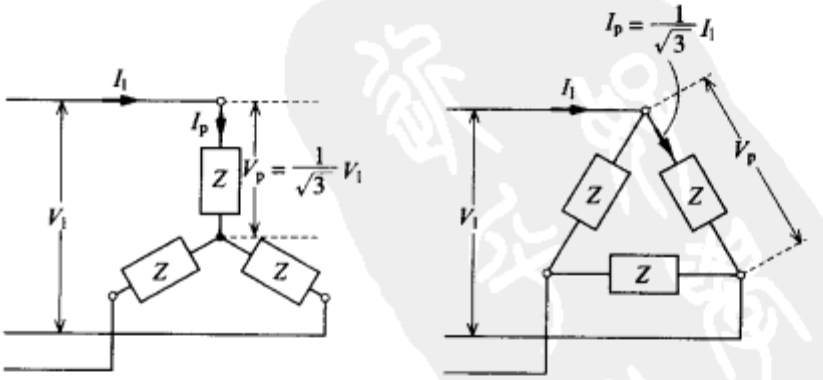
三相功率

今设加在三相负载上的相电压为 V_p(V)、负载中所流电流为 I_p(A)、相电压与相电流的相位差为 θ(rad)，则每相的功率为 $V_pI_p\cos\theta$，故三相功率 P 可表示如下：

$$P=3V_pI_p\cos\theta$$

如将上式中的相电压、相电流用线电压 V_l、线电流 I_l 来表示，则如图 3.67 所示考虑到在Y形连接负载时 $V_p=\frac{1}{\sqrt{3}}V_l$、$I_p=I_l$；在△形连接负载时 $V_p=V_l$、$I_p=\frac{1}{\sqrt{3}}I_l$，因此将这两种情形综合起来，可知 P 如下式所示：

$$P=\sqrt{3}V_lI_l\cos\theta \ (\mathrm{W})$$



(a) Y形连接负载　　(b) △形连接负载

图 3.67　三相功率

三相功率的三角形图

三相电路的视在功率 S、有功功率 P、无功功率 Q 之间的关系如下式所示，可用图 3.68 所示的直角三角形来表示：

$S=\sqrt{3}V_l I_l$（V·A）（视在功率=$\sqrt{3}$×线电压×线电流）

$P=\sqrt{3}V_l I_l\cos\theta$（W）（有功功率=视在功率×功率因数）

无功功率因数

$Q=\sqrt{3}V_l I_l\sin\theta$（var）（无功功率=视在功率×无功功率因数）

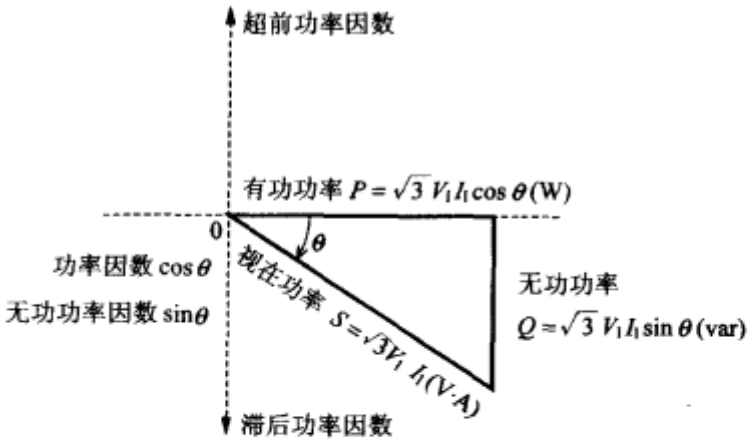


图 3.68　三相功率的三角形图

例 题

1 求图 3.69(a)、(b)所示电路中，当施加 $V=200$V 的三相交流电压时，求各电路每相的功率和三相功率。已知 $R=8\Omega$、$X_L=6\Omega$。

答　各相的阻抗 $|Z|$ 与功率因数 $\cos\theta$ 为：

$$|Z|=\sqrt{R^2+X_L^2}=\sqrt{8^2+6^2}=10\ (\Omega)$$

$$\cos\theta=R/Z=8/10=0.8$$

(1) 由于在Y形连接的三相电路中线电压大小是相电压的$\sqrt{3}$倍，线电流与相电流相等，故有

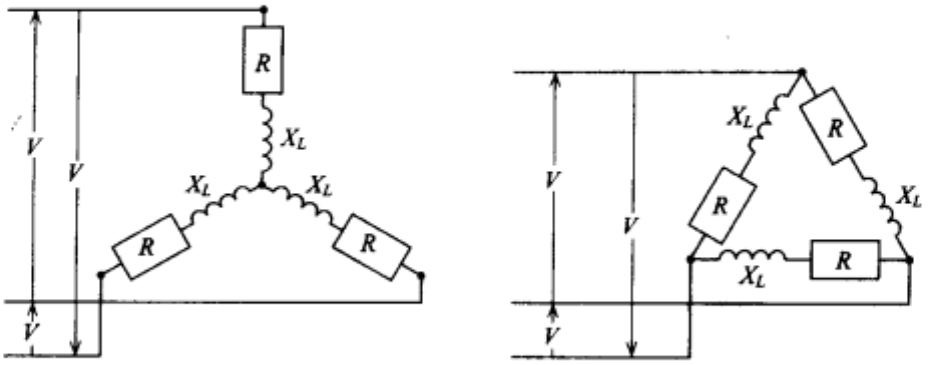
相电压=线电压/$\sqrt{3}$=200$\sqrt{3}$=115.5（V）

相电流=线电流=相电压/$|Z|$=115.5/10=11.55（A）

每相功率=相电压×相电流×功率因数=115.5×11.55×0.8

=1067（W）

三相功率＝一相功率×3＝1067×3＝3201（W）



(a) Y形连接负载　　(b) △形连接负载

图 3.69　例题 1 图

此外，三相功率也可用下列方法来求：

三相功率＝$\sqrt{3}$×线电压×线电流×功率因数

＝$\sqrt{3}$×200×11.55×0.8＝3201（W）

(2) 由于在△形连接的三相交流电路中线电压与相电压相等，线电流的大小是相电流的$\sqrt{3}$倍，故有

相电压＝线电压＝200（V）

相电流＝相电压/|Z|＝200/10＝20（A）

每相功率＝相电压×相电流×功率因数＝200×20×0.8＝3200（W）

三相功率＝一相功率×3＝3200×3＝9600（W）

此外，因为线电流＝相电流×$\sqrt{3}$＝20×$\sqrt{3}$＝34.64(A)，故三相功率还可按下式来求：

三相功率＝$\sqrt{3}$×线电压×线电流×功率因数

＝$\sqrt{3}$×200×34.64×0.8＝9600（W）

[2] 求线电压为 100V、功率因数为 0.85、三相功率为 4000W 的三相交流电路的线电流。

答　不论负载为Y形连接或是△形连接，三相功率 P 均为：

$$P=\sqrt{3}UI\cos\theta$$

因此，线电流可求出如下：

$$I=P/\sqrt{3}V\cos\theta=4000/(\sqrt{3}\times100\times0.85)=27.2\ (A)$$

16　不对称三相电路

要　点

把电源电压不对称或是负载不对称的三相电路称为不对称三相电路。由于每相的电流不同，故在Y-Y连接电路中中线上有电流流动。

解　释

Y-Y连接电路

在图 3.70 所示(对称电源-不对称负载)Y-Y连接电路中，随着各线电流大小不同，中线电流也不为 0。这时，可将各相作为单相电路来考虑，按下列方法求电流：

$$\dot{I}_a=\frac{\dot{E}_a}{Z_a}\ (\mathrm{A})$$

$$\dot{I}_b=\frac{\dot{E}_b}{Z_b}\ (\mathrm{A})$$

$$\dot{I}_c=\frac{\dot{E}_c}{Z_c}\ (\mathrm{A})$$

$$\dot{I}_0=\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c\ (\mathrm{A})$$

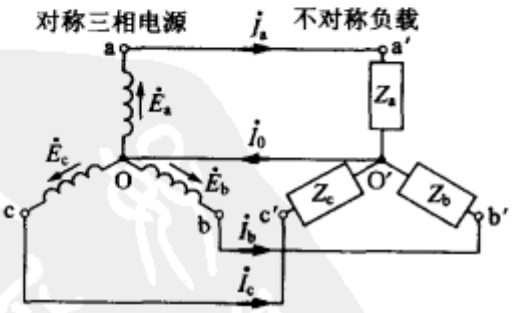


图 3.70　Y-Y连接不对称三相电路

没有中线的Y-Y连接电路

如图 3.71 所示，当负载不对称时，如设中点间的电压为 V_e，则对各相运用基尔霍夫定律可得到下式：

$$Z_a\,\dot{I}_a=\dot{E}_a-\dot{V}_e,\ Z_b\,\dot{I}_b=\dot{E}_b-\dot{V}_e,\ Z_c\,\dot{I}_c=\dot{E}_c-\dot{V}_e$$

$$\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c=0$$

各线电流为

$$I_a=\frac{Z_a\dot{V}_{ab}-Z_bV_{ca}}{Z_aZ_b+Z_bZ_c+Z_cZ_a}\ (\mathrm{A})$$

$$\dot{I}_b=\frac{Z_bV_{bc}-Z_cV_{ab}}{Z_aZ_b+Z_bZ_c+Z_cZ_a}\ (\mathrm{A})$$

$$\dot{I}_c=\frac{Z_bV_{ca}-Z_aV_{bc}}{Z_aZ_b+Z_bZ_c+Z_cZ_a}\ (\mathrm{A})$$

式中线电压为

$$\dot{V}_{ab}=\dot{E}_a-\dot{E}_b,\dot{V}_{bc}=\dot{E}_b-\dot{E}_c,\dot{V}_{ca}=\dot{E}_c-\dot{E}_a$$

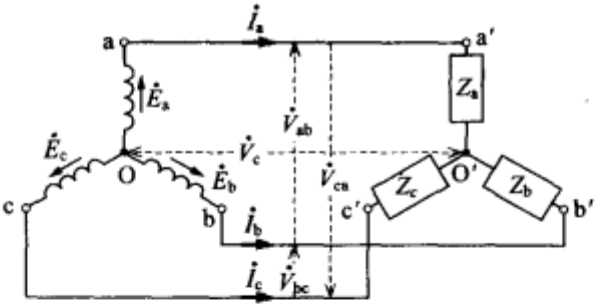
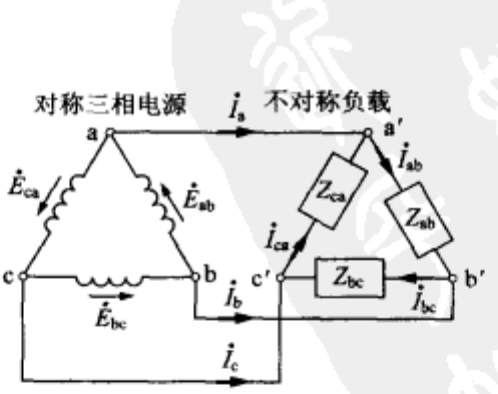


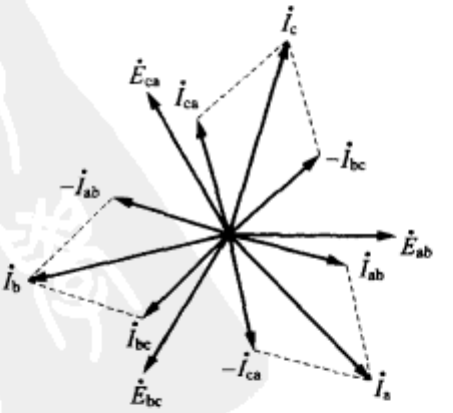
图 3.71　没有中线的Y-Y连接电路

△-△连接电路

对于图 3.72 所示这样的△-△连接不对称三相电路，可按与对称负载电路同样的步骤来进行计算。



(a) △-△连接电路



(b) 相量图

图 3.72　△-△连接不对称三相电路

首先求各个负载的相电流。由于是△形连接负载，故施加其上的各电压均为相电压，因此有

$$\dot{I}_{ab}=\frac{\dot{E}_{ab}}{Z_{ab}}\text{(A)},\dot{I}_{bc}=\frac{\dot{E}_{bc}}{Z_{bc}}\text{(A)},\dot{I}_{ca}=\frac{\dot{E}_{ca}}{Z_{ca}}\text{(A)}$$

其次，来求线电流。由于线电流与相电流具有如图3.72所示相量图这样的关系，故可按下列方法求得

$$\dot{I}_{a}=\dot{I}_{ab}-\dot{I}_{ca}=\frac{\dot{E}_{ab}}{Z_{ab}}-\frac{\dot{E}_{ca}}{Z_{ca}}\text{(A)}$$

$$\dot{I}_{b}=\dot{I}_{bc}-\dot{I}_{ab}=\frac{\dot{E}_{bc}}{Z_{bc}}-\frac{\dot{E}_{ab}}{Z_{ab}}\text{(A)}$$

$$\dot{I}_{c}=\dot{I}_{ca}-\dot{I}_{bc}=\frac{\dot{E}_{ca}}{Z_{ca}}-\frac{\dot{E}_{bc}}{Z_{bc}}\text{(A)}$$

在实际计算时，可将上式直接以复数形式进行计算。

不对称三相电路的功率

在不对称时，三相电路的功率可作为负载的各相功率之和来求得。即对图3.73所示△形连接不对称负载，相电压V_{ab}、V_{bc}、V_{ca}分别与相电流$\dot{I}_{ab}$、$\dot{I}_{bc}$、$\dot{I}_{ca}$的乘积之和为三相视在功率，其实部为有功功率、虚部为无功功率。

$$\begin{aligned}S&=\dot{V}_{ab}\dot{I}_{ab}+\dot{V}_{bc}\dot{I}_{bc}+\dot{V}_{ca}\dot{I}_{ca}\\&=P+jQ\end{aligned}$$

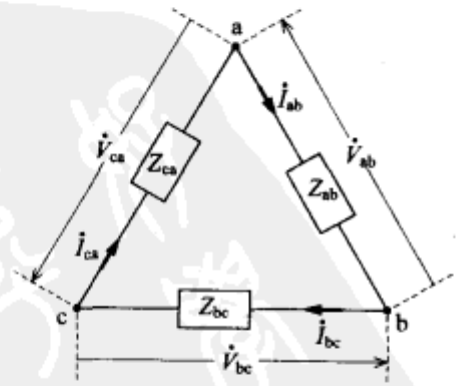


图3.73　△形连接不对称负载

此外，设各相电压与相电流的相位差分别为θ_{ab}、θ_{bc}、θ_{ca}，并采用有效值，则有

$$\begin{aligned}\text{有功功率 }P=&V_{ab}I_{ab}\cos\theta_{ab}+V_{bc}I_{bc}\cos\theta_{bc}\\&+V_{ca}I_{ca}\cos\theta_{ca}\end{aligned}$$

无功功率 $Q=V_{ab}I_{ab}\sin\theta_{ab}+V_{bc}I_{bc}\sin\theta_{bc}$
$+V_{ca}I_{ca}\sin\theta_{ca}$

视在功率 $S=\sqrt{P^2+Q^2}$

例　题

[1] 试求图 3.74 所示不对称三相交流电路的各线电流，并作出相量图。

$\dot{E}_a=100\angle 0$ (V)　　$Z_a=20$ (Ω)

$\dot{E}_b=100\angle -\frac{2}{3}\pi$ (V)　　$Z_b=50$ (Ω)

$\dot{E}_c=100\angle -\frac{4}{3}\pi$ (V)　　$Z_c=25$ (Ω)

答　首先，将各相作为单相电路考虑来求相电流，再将其和作为中线电流来求得。相量图如图 3.75 所示。

$$\dot{I}_a=\frac{\dot{E}_a}{Z_a}=\frac{100\angle 0}{20}=5\angle 0=5\ (\mathrm{A})$$

$$\dot{I}_b=\frac{\dot{E}_b}{Z_b}=\frac{100\angle -\frac{2}{3}\pi}{25}=2\angle -\frac{2}{3}\pi=-1+j\sqrt{3}\ (\mathrm{A})$$

$$\dot{I}_c=\frac{\dot{E}_c}{Z_c}=\frac{100\angle -\frac{4}{3}\pi}{25}=4\angle -\frac{4}{3}\pi=-2+j\sqrt{3}\ (\mathrm{A})$$

$$\dot{I}_0=\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c=5-1-j\sqrt{3}-2+j2\sqrt{3}$$
$$=2+j\sqrt{3}\ (\mathrm{A})$$

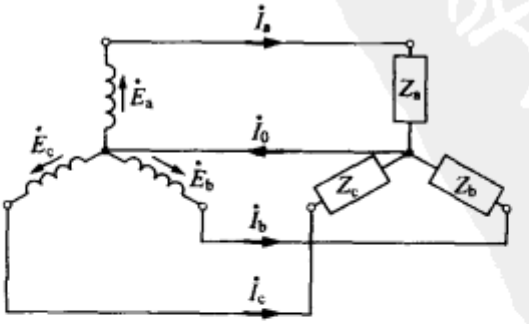


图 3.74　例题 1 图

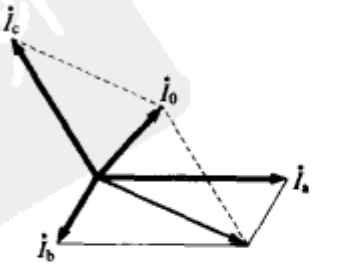


图 3.75　例题 1 的电流相量图

17　非正弦交流

要　点

将波形不是正弦的交流称为非正弦交流或畸变波。非正弦交流可以分解成频率不同的正弦交流之和。

解　释

周期函数的非正弦交流

周期函数

若将某一频率的正弦交流与具有其整数倍频率的正弦交流合成，则合成波为周期性变化的**周期函数**。一般地，作为周期函数的非正弦交流，可以分解成频率与其相同的正弦交流和具有各种相位、最大值及其整数倍频率的正弦波之和，如下式所示：

$$i = I_0 + I_1\sin(\omega t+\theta_1) + I_2\sin(2\omega t+\theta_2) + I_3\sin(3\omega t+\theta_3) + \cdots + I_n\sin(n\omega t+\theta_n)$$

（直流成分）　（基波）　（二次谐波）　（三次谐波）　（n 次谐波）

对称波与不对称波

基波

谐波

合成波

对称波

不对称波

图 3.76(a)所示的非正弦波是由**基波** i_1 与三次**谐波** i_3 的合成波。而图 3.76(b)所示的非正弦波则是由基波 i_1 与四次谐波 i_4 的合成波。图 3.76(a)的**合成波**是正半波与负半波以相同波形重复变化，若将正半波移动半周则对横轴与负半波对称。这样的交流波形称为**对称波**。另一方面，像图 3.76(b)这样的合成波，其正半波与负半波不对称，则将其称为**不对称波**。

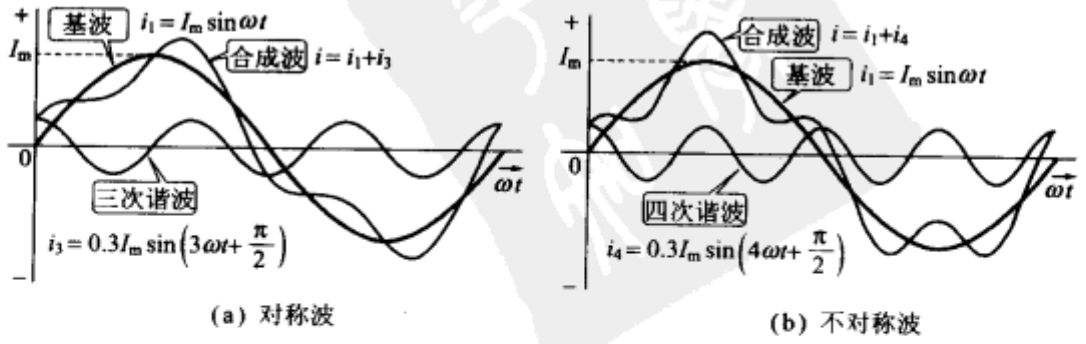


图 3.76　对称波与不对称波

仅含基波和奇数谐波的非正弦波为对称波，而含偶数次高次谐波的非正弦波则为不对称波。

非正弦交流的有效值

非正弦交流的有效值 I(A)也与正弦交流同样，可用瞬时值平方的平均值的平方根表示，如令瞬时值为 i(A)，则可表示如下：

$$I=\sqrt{(i^2\text{ 在 1 周期内的平均值})}$$

由于瞬时值 i 是由许多正弦波汇集而成，设其直流成分为 I_0，各次谐波的有效值为 I_1、I_2、I_3、…，则 i 的有效值如下式所示：

$$I=\sqrt{I_0^2+I_1^2+I_2^2+I_3^2+\cdots}$$

畸变因数、波形因数、波顶因数

畸变因数
波形因数
波顶因数

非正弦波与正弦波相比，其波形畸变的程度用**畸变因数**表示；波形的平滑度用**波形因数**表示；波形的尖锐程度用**波顶因数**表示，如下式所示：

$$\text{畸变因数}=\frac{\text{全部高次谐波的有效值}}{\text{基波的有效值}}=\frac{\sqrt{V_2^2+V_3^2+V_4^2+\cdots}}{V_1}\times 100\ (\%)$$

$$\text{波形因数}=\frac{\text{有效值}}{\text{平均值}}$$

$$\text{波顶因数}=\frac{\text{最大值}}{\text{有效值}}$$

非正弦交流的功率与功率因数

非正弦交流的功率仅产生于同频的电压与电流之间，它们的和就是全部功率，不同频率的电压与电流之间不产生功率。因此，功率如下式所示：

$$P=V_0I_0+V_1I_1\cos\theta_1+V_2I_2\cos\theta_2+V_3I_3\cos\theta_3+\cdots\ (\text{W})$$

此外，视在功率与功率因数如下式所示：

$$\text{视在功率}=VI=\sqrt{(V_0^2+V_1^2+V_2^2+V_3^2+\cdots)(I_0^2+I_1^2+I_2^2+I_3^2+\cdots)}\ (\text{V}\cdot\text{A})$$

$$\text{功率因数}=\frac{\text{有功功率}}{\text{视在功率}}=\frac{(V_0I_0+V_1I_1\cos\theta_1+V_2I_2\cos\theta_2+\cdots)}{\sqrt{(V_0^2+V_1^2+V_2^2+\cdots)(I_0^2+I_1^2+I_2^2+\cdots)}}$$

例　题

[1] 试求以 $v=150\sqrt{2}\sin4\pi t$(V)为基波的非正弦交流电压的三次谐波的频率。

答 因基波的角频率为

$$\omega_1=4\pi\ (\text{rad/s})$$

故三次谐波的角频率为

$$\omega_3=3\times4\pi=12\pi\ (\text{rad/s})$$

由 $\omega=2\pi f$ 可知 $f=\omega/2\pi$。因此，三次谐波的频率为

$$f_3=\frac{\omega_3}{2\pi}=\frac{12\pi}{2\pi}=6\ (\text{Hz})$$

[2] 在图 3.77 所示 RL 电路中施加非正弦交流电压

$$v=100\sqrt{2}\sin400t+50\sqrt{2}\sin800t+40\sqrt{2}\sin1200t\ (\text{V})$$

试求电路所消耗的功率与功率因数。

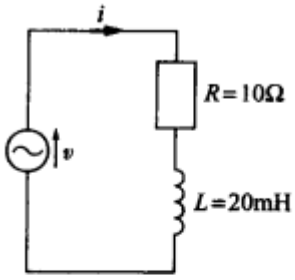


图 3.77　例题 2 图

答 此非正弦交流电压的基波为 $v_1=100\sqrt{2}\sin400t$(V)，二次谐波为 $v_2=50\sqrt{2}\sin800t$(V)，三次谐波为 $v_3=40\sqrt{2}\sin1200t$(V)，根据叠加原理，可求各谐波电压单独作用下的电路情形，然后再进行叠加(见图 3.78)。

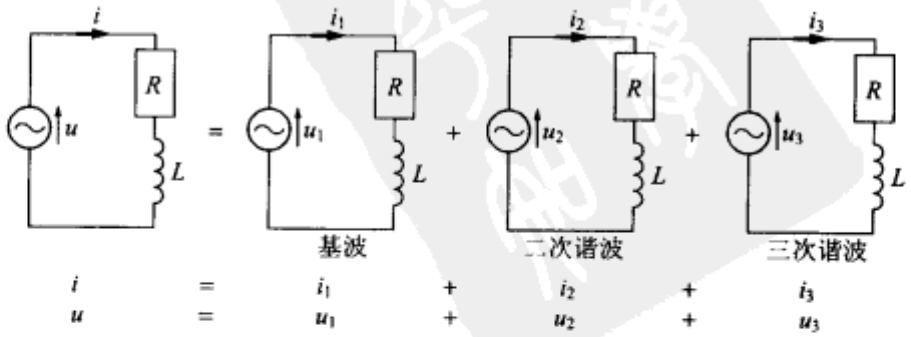


图 3.78　电路的分解

在各谐波时的阻抗为

$$Z_1=R+j\omega L=10+j(400\times20\times10^{-3})=10+j8=12.8\angle38.7^\circ\ (\Omega)$$

$$Z_2=R+j2\omega L=10+j(800\times20\times10^{-3})=10+j16=18.9\angle58.0^\circ\ (\Omega)$$

$$Z_3=R+j3\omega L=10+j(1200\times20\times10^{-3})=10+j24=26\angle67.4^\circ\ (\Omega)$$

因此，各电流为

$$\dot{I}_1=\frac{\dot{V}_1}{Z_1}=\frac{100}{12.8\angle38.7^\circ}=7.81\angle-38.7^\circ\ (\mathrm{A})$$

$$\dot{I}_2=\frac{\dot{V}_2}{Z_2}=\frac{50}{18.9\angle58.0^\circ}=2.65\angle58.0^\circ\ (\mathrm{A})$$

$$\dot{I}_3=\frac{\dot{V}_3}{Z_3}=\frac{40}{26\angle67.4^\circ}=1.54\angle67.4^\circ\ (\mathrm{A})$$

消耗的功率 P 为：

$$\begin{aligned}P&=V_1I_1\cos\theta_1+V_2I_2\cos\theta_2+V_3I_3\cos\theta_3\\&=100\times7.81\times0.78+50\times2.65\times0.53+40\times1.54\times0.38\\&=698.8\ (\mathrm{W})\end{aligned}$$

功率因数 P_f 可由下式求得：

$$V=\sqrt{100^2+50^2+40^2}=118.7\ (\mathrm{V})$$

$$I=\sqrt{7.81^2+2.65^2+1.54^2}=8.39\ (\mathrm{A})$$

因此

$$P_f=\frac{P}{VI}=\frac{698.8}{118.7\times8.39}=0.70$$

[3] 试求下式表示的非正弦交流电压的畸变因数：

$$v=50\sin\omega t-20\sin2\omega t+10\sin3\omega t$$

答　各谐波电压的有效值为

$$V_1=\frac{50}{\sqrt{2}}=35.36\ (\mathrm{V})$$

$$V_2=-\frac{20}{\sqrt{2}}=-14.14\ (\mathrm{V})$$

$$V_3=\frac{10}{\sqrt{2}}=7.07\ (\mathrm{V})$$

因此，畸变因数 k 为：

$$k=\frac{\sqrt{V_2^2+V_3^2}}{V_1}\times100=\frac{\sqrt{(-14.14)^2+7.07^2}}{35.36}\times100=44.7\ (\%)$$

18 RL 串联电路的过渡过程

要 点

在含有电感或电容的电路中当接通或断开电源时，此电路中的电流会在经历一段时间的变化之后到达另一稳定的状态。把到达此一稳定状态前的电气过程称为过渡过程。

解 释

RL 串联电路的接通

在图 3.79 所示的 RL 串联电路中，合上开关 S_1，设经时间 t(s)后的电流为 i(A)，此电流 i 是缓慢增大的，最终为 $i=I$。

对此，可建立电压平衡方程式如下：

$$L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+Ri=E \tag{3.6}$$

此微分方程式的解为

$$i=\frac{E}{R}(1-\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t})=\frac{E}{R}(1-\mathrm{e}^{-\frac{1}{\tau}t})$$

这里，电流增大的变化率取决于时间常数 $\tau=L/R$。

微分方程式的解法

积分常数

所谓微分方程式就是含有导函数的方程式，求解微分方程式可以使用积分。因此，在解中包含**积分常数**。例如，解式(3.6)的微分方程式可以这样进行：

稳态电流
暂态电流

令**稳态电流**为 i_s、**暂态电流**为 i_t，则有 $i=i_s+i_t$ 及

$$Ri_s=E,\ L\frac{\mathrm{d}i_t}{\mathrm{d}t}+Ri_t=0$$

由上式可知

$$i_s=\frac{E}{R}$$

$$\frac{\mathrm{d}i_t}{\mathrm{d}t}=-\frac{R}{L}\mathrm{d}t \tag{3.7}$$

暂态电流可由将式(3.7)两边积分求出：

$$\int\frac{\mathrm{d}i_t}{\mathrm{d}t}=-\frac{R}{L}\int\mathrm{d}t$$

$$\ln i_t = -\frac{R}{L}t + K(K \text{ 为积分常数})$$

则 $i_t = e^{-\frac{R}{L}t+K} = e^{-\frac{R}{L}t} \cdot e^K = Ae^{-\frac{R}{L}t}(e^K = A \text{ 为常数})$

因此有

$$i = i_s + i_t = \frac{E}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t} \tag{3.8}$$

初始条件

代入**初始条件** $t=0$ 时 $i=0$，可得

$$A = -\frac{E}{R}$$

故式(3.8)可写为

$$i = \frac{E}{R} + Ae^{-\frac{R}{L}t} = \frac{E}{R} - \frac{E}{R}e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t})$$

RL 串联电路的放电

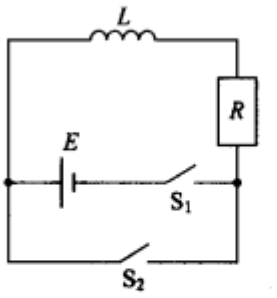


图 3.79　*RL* 串联电路

在图 3.79 所示电路中，当开关 S_1 合上经过充足时间，电路中是稳态电流在流动。由此稳态开始打开开关 S_1 合上 S_2，则在 L 中储存的磁场能量放出，电路中有过渡过程电流 i 流动(见图 3.80)。

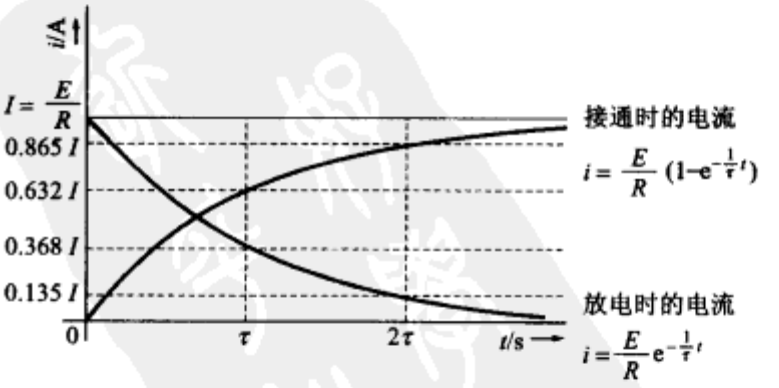


图 3.80　*RL* 电路在过渡过程的电流

此时，电压方程式如下：

$$L\frac{di}{dt} + Ri = 0$$

式中，左边表示电阻、电感上的压降，右边为 0 是因为电路

中不含电动势。

解此微分方程式则有

$$i=\frac{E}{R}e^{-\frac{R}{L}t}=\frac{E}{R}e^{-\frac{1}{\tau}t} \tag{3.9}$$

时间常数

时间常数

时间常数是衡量过渡过程时间长短的一个物理量，在图 3.79 所示电路中，当着眼于电流如何随时间 t(s)增大时就要用到。

如图 3.81 所示，在 O 点引切线，将此切线与表示稳态电流 $I=E/R$ 的线的交点所对应的时间以 τ(s)表示，则 τ 值的含义如下。

首先，求切线的斜率：

$$\tan\theta=\left(\frac{di}{dt}\right)_{t=0}=\left[\frac{d\left[\frac{E}{R}\left(1-e^{-\frac{R}{L}t}\right)\right]}{dt}\right]_{t=0}$$

$$=\left[\frac{E}{R}\cdot\frac{R}{L}e^{-\frac{R}{L}t}\right]_{t=0}=\frac{E}{L}$$

因为 $\tan\theta=\dfrac{E/R}{\tau}$，故

$$\frac{E}{L}=\frac{E/R}{\tau},\tau=\frac{L}{R}\text{ (s)}$$

在 $t=\tau$ 时的电流值可由式(3.6)、式(3.9)求得。

在接通时

$$i=\frac{E}{R}(1-e^{-1})=I\left(1-\frac{1}{2.71828}\right)=0.632I$$

在放电时

$$i=\frac{E}{R}e^{-1}=\frac{1}{2.71828}\cdot\frac{E}{R}=0.368\frac{E}{R}$$

换言之，时间常数就是到达 63.2%最终值时的时间。

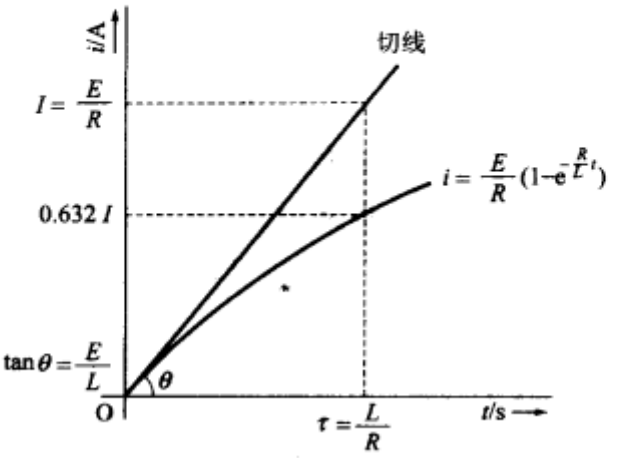


图 3.81　时间常数

例　题

1　在图 3.79 所示电路中，$R=100(\Omega)$，$L=100(\text{mH})$，$E=100(\text{V})$，试回答下列问题：

(1) 求此电路的时间常数。

(2) 求开关 S_1 闭合后经过 2ms 后的电流值。

答　(1) $\tau=\dfrac{L}{R}=\dfrac{100\times10^{-3}}{100}=10^{-3}\ (\text{s})$

(2) $i=\dfrac{E}{R}\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right)=\dfrac{200}{100}\left(1-e^{-\frac{1}{10^{-3}}\times2\times10^{-3}}\right)=2(1-e^{-2})=1.73\ (\text{A})$

19 RC 串联电路的过渡过程

要 点

RC 串联电路的充电电流为

$$i=\frac{E}{R}e^{-\frac{1}{CR}t}\ (\mathrm{A})$$

放电电流为

$$i=-\frac{E}{R}e^{-\frac{1}{CR}t}\ (\mathrm{A})$$

时间常数为

$$\tau=CR$$

解 释

RC 串联电路的充电

在图 3.82 所示的电路中，当开关 S_1 合上以后，最初在电路中有电流 $i=E/R$(A)流动，但此电流会缓慢减小，最终为 0。换言之，在电容器上储存的电荷 q(C)缓慢地增长，最终以 $q=ce$(C)的电荷储存起来。随着此电荷 q 的增长，电容器两端的电压 v_C 也缓缓增大，最终变为 $v_C=E$(V)。因为电流为 $i=(E-v_C)/R$(A)，故随着电容器两端电压 v_C 的增大，电流则减小(见图 3.83)。令开关闭合后又经过 t(s)后的电流为 i(A)，则电荷 q 与 i 的关系为：

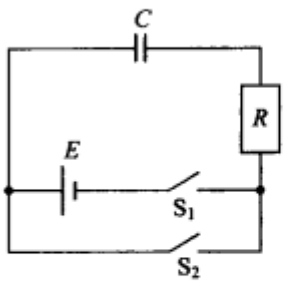


图 3.82 RC 串联电路

$$i=\frac{dq}{dt}\quad 则\ q=\int i\,dt$$

此外，由 $v_C=q/C$ 可知电压平衡方程式为

$$R=\frac{dq}{dt}+\frac{q}{C}=E$$

此微分方程式的解为

$$q=CE(1-e^{-\frac{1}{CR}t})$$

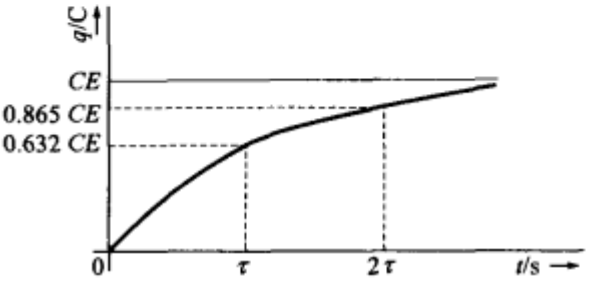
由此式可知电流 i 与电压 v_C 分别为：

$$i=\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}=CE\cdot\frac{1}{CR}\mathrm{e}^{-\frac{1}{\tau}t}=\frac{E}{R}\mathrm{e}^{-\frac{1}{\tau}t}\ (\mathrm{A})$$

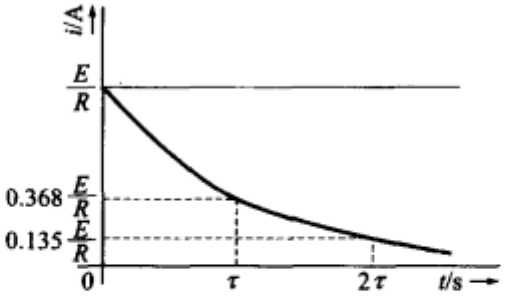
$$v_C=\frac{q}{C}=E(1-\mathrm{e}^{-\frac{1}{\tau}t})\ (\mathrm{V})$$

RC 串联电路的时间常数为

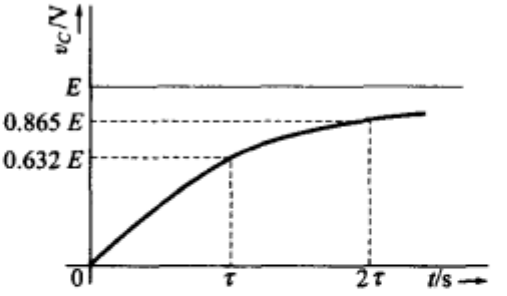
$$\tau=CR$$



(a) 电荷



(b) 电流



(c) 电压

图 3.83　*RC* 电路的充电

RC 串联电路的放电

在图 3.82 所示的 *RC* 串联电路中，当电容器充电充足后打开 S_1 合上 S_2，电荷 q_s 通过 *R* 放电。这时，因为电路中没有电动势，故有下式成立：

$$R\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}+\frac{q}{C}=0$$

此微分方程式的解为

$$q=A\mathrm{e}^{-\frac{1}{\tau}t}$$

因为上式中 $t=0$ 时 $q=q_s$，故有

$$A=q_s$$

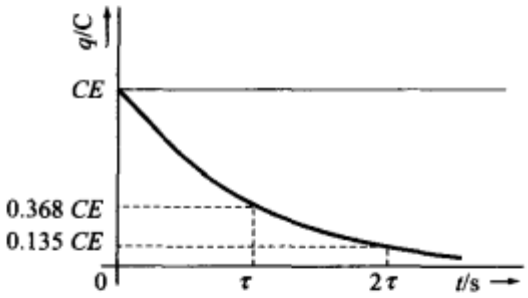
因此

$$q = q_s e^{-\frac{1}{CR}t}$$

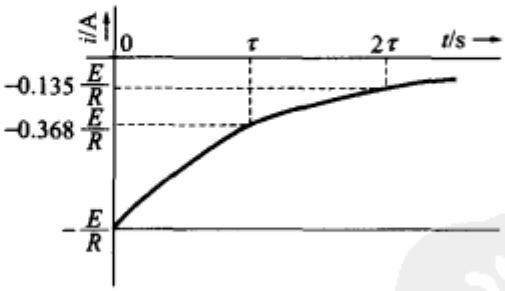
此式表明，在电容器上充电充足的电荷 q_s 随时间增长而减少，当电荷全部移动完毕时电流为 0。因此，放电电流可求得如下(见图 3.84)：

$$i = \frac{dq}{dt} = q_s\left(-\frac{1}{CR}\right)e^{-\frac{1}{CR}t} = -\frac{CE}{CR}e^{-\frac{1}{CR}t}$$

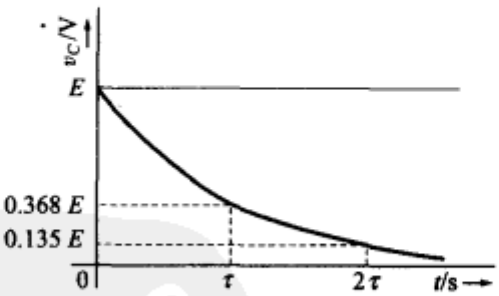
$$= -\frac{E}{R}e^{-\frac{1}{CR}t} = -Ie^{-\frac{1}{CR}t}$$



(a) 电荷



(b) 电流



(c) 电压

图 3.84 RC 电路的放电

微分电路

微分电路
积分电路

在电子电路中，作为过渡过程的应用举例，有**微分电路**、**积分电路**。所谓微分电路是指在输出回路的输出，正比于输入电压 e_i 对时间的变化率 de_i/dt，一般输入波形多采用方波。

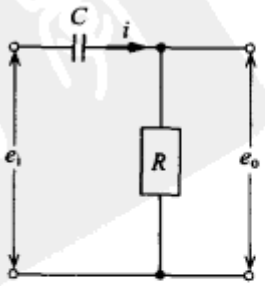


图 3.85 微分电路

令图 3.85 所示电路中输

入电压为 e_i，输出电压为 e_o，电流为 i，则有下式成立：

$$i=\frac{e_o}{R}=C\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(e_i-e_o),\frac{e_o}{CR}+\frac{\mathrm{d}e_o}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}e_i}{\mathrm{d}t}$$

如果电路的时间常数 $\tau=CR$ 比脉冲宽度 T 充分小，则有 $\frac{e_o}{CR}\gg\frac{\mathrm{d}e_o}{\mathrm{d}t}$ 关系，故

$$e_o=CR\frac{\mathrm{d}e_i}{\mathrm{d}t}$$

即输出电压 e_o 与输入电压 e_i 的微分值成正比。图 3.86 表示将周期为 T 的方波输入电压施加到电路上时输出电压的波形，时间常数 CR 越小输出电压的波形越尖锐。这种电路称为微分电路。

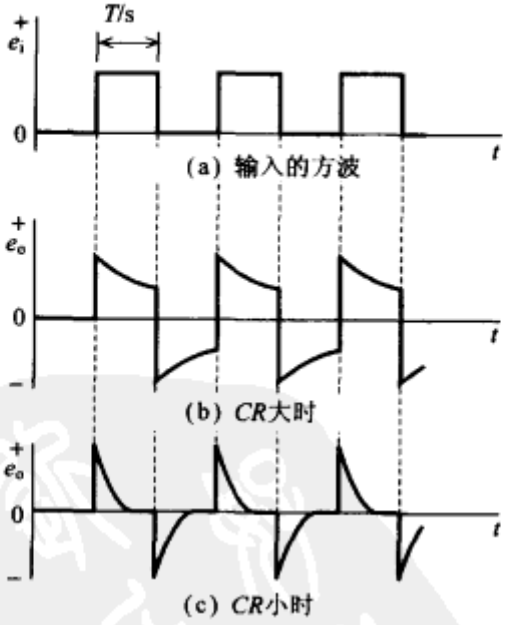


图 3.86　微分电路的输入、输出波形

积分电路

在图 3.87 所示电路中，令输入电压为 e_i，输出电压为 e_o，电流为 i，则有下列关系成立：

$$e_i=Ri+\frac{1}{C}\int i\mathrm{d}t$$

$$e_i=Ri+e_o$$

由上式中消去 i，则有

$$e_i = (e_i - e_o) + \frac{1}{C}\int \frac{e_i - e_o}{R}\mathrm{d}t$$

$$e_o + \frac{1}{CR}\int e_o \mathrm{d}t = \frac{1}{CR}\int e_i \mathrm{d}t$$

这里，若 $\tau = CR$ 非常大，有 $e_o \gg \frac{1}{CR}\int e_o \mathrm{d}t$ 关系，则可得

$$e_o = \frac{1}{CR}\int e_i \mathrm{d}t$$

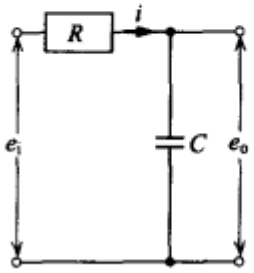


图 3.87 积分电路

即输出电压 e_o 与输入电压 e_i 的积分值成正比。图 3.88 表示与微分电路的情况同样，将周期为 T 的输入电压施加到电路上时输出电压的波形，时间常数 CR 的值越大输出电压的波形越平缓。这种电路称为积分电路。

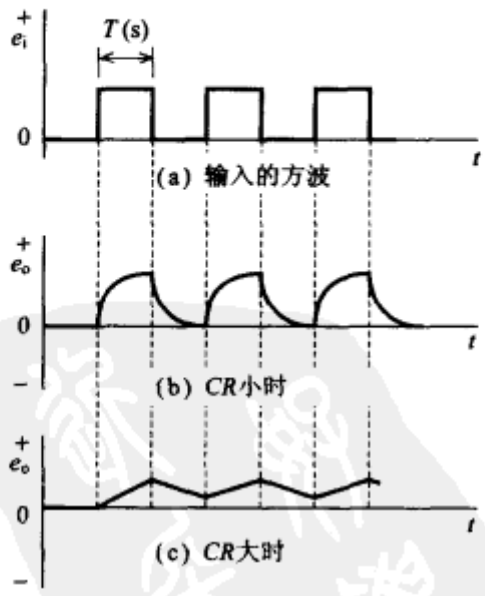


图 3.88 积分电路的输入、输出波形

第4章

电子电路的基本原理

● 责任编委
柿下和彦
● 执　　笔
柿下和彦 (1 ~ 8)
半田伸明 (9)
小野寺理文 (10 ~ 15)
黑柳秋男 (16 ~ 20)

电子电路几乎存在于生产和生活各个领域所使用的所有机器中。本章将阐述作为电子电路的基础，有关电子器件、电子电路以及数字电子技术的基本知识。在电子器件的基本知识当中，基于对作为制作电子器件的材料——半导体的理解，将介绍最基本的电子器件，即二极管、晶体管、运算放大器、发光元件、受光元件。此外，作为电子电路的基础，将介绍晶体管放大电路、偏置电路、调制解调电路及电源电路。在数字电子技术基础方面，将对数字电路中数的表示给予初步的说明，然后再介绍有关逻辑电路、数字集成电路（IC）及模拟与数字变换的知识。

1　什么是半导体

要　点

“半导体”是其电阻率介于“导体”和“绝缘体”之间的物质。导体的电阻率虽然随着温度的升高而增大，但半导体的电阻率却随着温度的升高而减小，其电阻的温度系数为负。在半导体之中有由一种元素构成的单元素半导体和由两种以上元素构成的化合物半导体。

解　释

导体、半导体、绝缘体

物质按其电阻率的大小可分为导体(conductor)、半导体(semiconductor)、绝缘体(insulator)三类。这里，对电阻率有下列定义。现在考虑一个如图 4.1 所示长 l(m)、截面积为 A(m²)的圆柱体，当在其上施加电压 V(V)时若有电流 I(A)流动，则此圆柱体的电阻为

$$R=\frac{V}{I}\ (\Omega) \tag{4.1}$$

电阻率为

$$\rho=R\cdot\frac{A}{l}\ (\Omega\cdot\mathrm{m}) \tag{4.2}$$

电阻 R 的数值会随物质的大小而变化，但电阻率 ρ 却是物质的固定数值，与其大小无关。

根据这个电阻率来将物质分类，则如图 4.2 所示。不过，导体、半导体、绝缘体的电阻率并没有严格的界线。

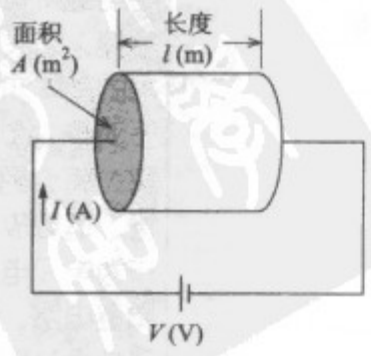


图 4.1　电阻率的定义

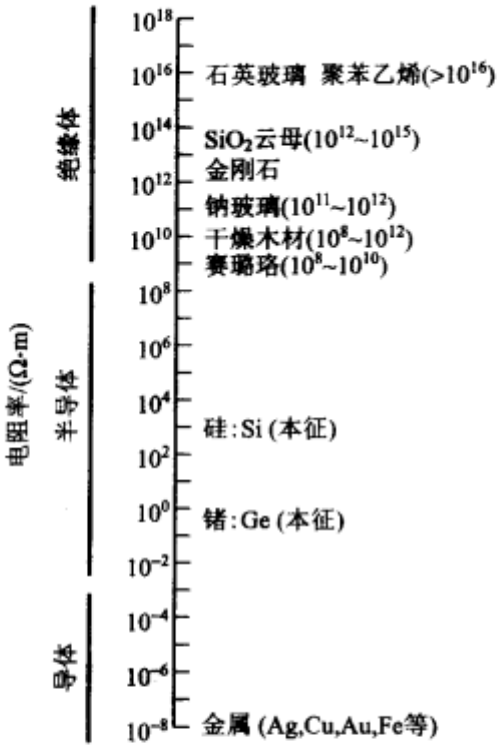


图 4.2 物质的电阻率(室温时)

半导体的特点

导体或半导体即便电阻率不同,在室温时同样可以流通电流。但是,一般以金属为代表的导体其电阻率却随温度的上升而增大,与此相反,半导体的电阻率则随温度的上升而减小,即电阻的温度系数(temperature cofficient)为负。半导体的电阻率在绝对温度 0 度(−273℃)时非常大,利用半导体,可以制成具有整流作用、放大作用的电子器件。

成为半导体的物质

在半导体中有由一种元素构成的单元素半导体(elemental semiconductor)和由两种以上元素构成的化合物半导体(compound semiconductor)。表 4.1 列出半导体的若干示例。半导体具有称为**能带隙**或禁带宽度(band gap,energy gap)的固有值。在半导体中,当将用具有能带隙以上能量的光照射时,此光会被吸收;但若是能带隙以下能量的光,则会透过半导体。因此,能带隙是利用半导体制

能带隙

作光器件时的一个重要参数。

表 4.1　半导体示例

	元素族	典型示例	能带隙(室温)/eV
单元素半导体	Ⅳ	Si	1.11
		Ge	0.67
化合物半导体	Ⅲ-Ⅴ	GaAs	1.4
		InP	1.3
		GaN	2.5
	Ⅱ-Ⅵ	ZnSe	2.6
		ZnS	3.6
		ZnO	3.2
		CdS	2.5
	Ⅵ-Ⅵ	SiC	2.8～3.2

选修知识

光是以光速 $c=3.00\times10^{8}$ (m/s)前进的波，可用振动次数 ν(Hz)与波长 λ(m)来表示(h 为布朗克常数)。波长为 λ(nm)的光所具有的能量为

$$E=h\nu=h\cdot\frac{c}{\lambda}=\frac{1239.85}{\lambda}\ (\text{eV}) \tag{4.3}$$

可见，光的波长及其能量如图 4.3 中所示。这里，(eV)是能量的单位，其含义为

$$1(\text{eV})=1.6022\times10^{-19}\ (\text{J}) \tag{4.4}$$

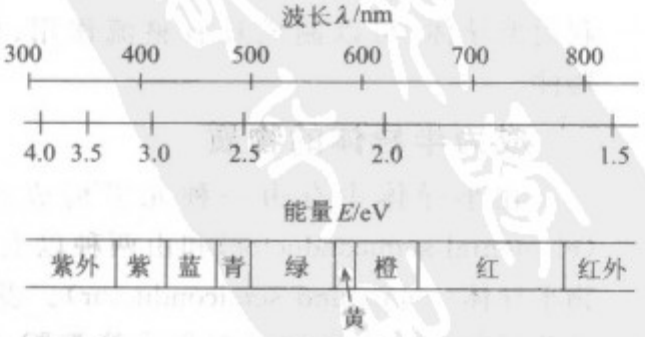


图 4.3　可见光的波长及其能量

2 掺杂半导体

要 点

半导体之所以能够为电子器件所用，其理由之一是能够随意地改变它的电阻率。改变电阻率的典型方法就是掺杂。在半导体的载流子中有电子和空穴(电子脱离后留下的“空洞”)。根据载流子的情况将电子多的半导体称为 n 型半导体，而空穴多的半导体则称为 p 型半导体。

解 释

半导体的构造

这里以典型的半导体——硅(Si 即 Silicon)为例，来说明其构造与特点。Si 的构造示意如图 4.4 所示。Si 的原子序号为 14，在 14 个**质子**的周围有 14 个电子(electron)。其中在最外层有 4 个电子称为**价电子**(valence electron)，如图 4.4 所示，与相邻的硅原子相互提供电子组成**共价键**(covalent bonding)。处于共价键之中的电子不能自由移动，但若 Si 受到能(温度或光等)的作用，这种结合就会被破坏，使电子能够在晶体中自由运动成为自由电子(free electron)。再有，电子脱离后留下的空洞会被相邻的 Si 原子中的电子进入而填补上，这种空洞也可以认为能够在Si的晶体中自由

质子
价电子
共价键

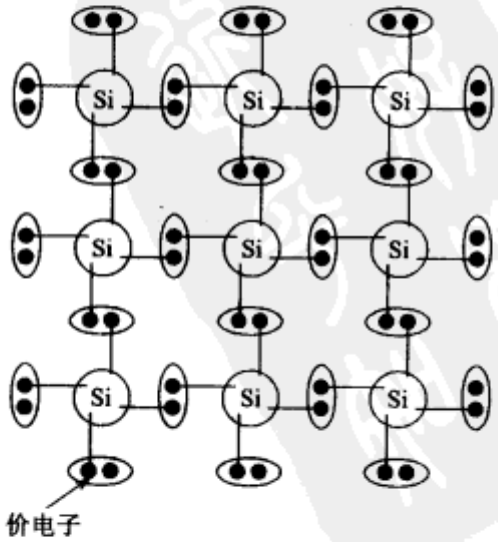


图 4.4 Si 的构造示意

运动。称这种电子脱离后留下的空洞为空穴(hole)。空穴可以看作是具有正电荷和一定质量的粒子。电流就是由于这两种粒子(电子与空穴)的运动而流动。因此,这些粒子被称为**载流子**(carrier)。在导体中载流子虽可为电子或是空穴二者居一,但在半导体中却是以具有电子和空穴这两者作为特征。

载流子

半导体的电阻率

半导体之所以能为电子器件所用的理由之一是,其电阻率能够任意改变。

电阻率可用

$$\rho=\frac{1}{nq\mu} \tag{4.5}$$

来表示。式中,$n(\mathrm{m}^{-3})$为载流子浓度,$q(\mathrm{C})$为电荷量,$\mu(\mathrm{m}^2/\mathrm{V}\cdot\mathrm{s})$为**迁移率**(mobility),它表示当施加外电场时载流子的可移动程度。由式(4.5)可知,欲改变电阻率可以改变载流子浓度。使半导体的载流子浓度改变可用掺入杂质的掺杂(doping)方法。

迁移率

n 型半导体

以 Si 为例来作说明。今在 4 价的硅中掺入 5 价的磷(phosphorous)。P 原子有 15 个质子,其周围有 15 个电子,价电子的数目有 5 个。图 4.5 表示掺入 P 后的 Si 的构造示意。如图 4.5 所示,P 的 5 个价电子当中有 4 个价电子与其周围的 Si 的价电子组成共价键,还剩下 1 个价电子没有处在共价键中。这个电子在低温时虽受 P 的质子约束,但只要给予很少的能量就能使其脱离束缚,成为在晶体中能自由运动的自由电子。因此,掺入 1 个杂质原子就能增加 1 个自由电子。即改变掺杂的量,可使**载流子浓度**、电阻率改变。

载流子浓度

对于 Si 中掺入 P 这样的使电子增加的杂质称为施主(donor),掺入施主杂质使电子浓度增加的半导体称为 **n 型半导体**(n-type semiconductor)。在 n 型半导体中,因为电子的浓度比空穴的浓度大,故称电子为**多数载流子**(majoritycarrier),空穴为**少数载流子**(minoritycarrier)。

n 型半导体

多数载流子

少数载流子

施主

施主杂质在电子被束缚的状态，其带电状态呈中性，但在电子成为自由电子后就变成带正电的施主离子。

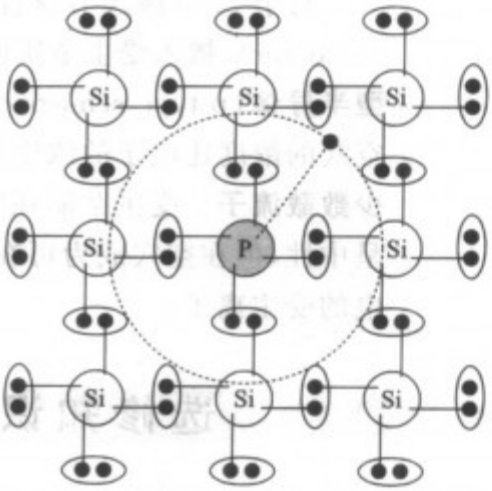


图 4.5 n 型半导体的构造示意

p 型半导体

仍以 Si 为例说明。在 4 价的 Si 中掺入 3 价的杂质硼价。B 原子有 13 个质子，其周围有 13 个电子，价电子数目有 3 个。图 4.6 表示掺入 B 后 Si 的构造示意。如图 4.6 所示，B 的 3 个价电子全部与 B 周围的 Si 的价电子组成共价键，但还有 1 个 Si 的价电子未能组成共价键，成为电子不足(空穴)的状态。这个空穴在低温时虽受 B 的质子约束，

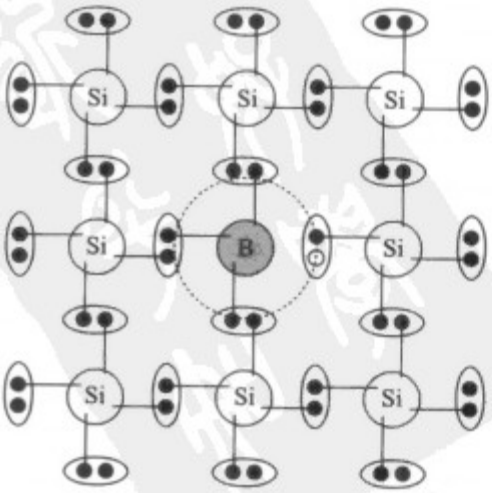


图 4.6 p 型半导体的构造示意

但只要给予很少的能量就能脱离束缚，成为能在晶体中自由运动的空穴。

受主
p型半导体

对于Si中掺入B这样的使空穴增加的杂质称为**受主**(acceptor)，掺入受主杂质使空穴浓度增加的半导体称为**p型半导体**(p-type semiconductor)。在p型半导体中，因为空穴的浓度比电子的浓度大，故空穴为**多数载流子**，电子为**少数载流子**。受主杂质在空穴被束缚的状态，其带电状态呈中性，但在空穴成为可在晶体内自由运动后就变成带负电的受主离子。

多数载流子
少数载流子

选修知识

没有掺入杂质的半导体称为本征半导体(i型半导体，intrinsic semiconductor)。此外，将受主杂质和施主杂质以相同数量掺入的半导体也是i型半导体。例如，pin二极管，就是按p型、i型、n型的顺序将这些半导体结合起来构成的二极管。

3 二极管

要点

二极管是在某一方向施加电压才有电流流动的具有整流作用的元件。

在二极管中有pn结二极管和半导体与金属结合的肖特基二极管。在二极管上施加反向电压会引起击穿现象。在二极管中还有齐纳二极管和隧道二极管等具有特殊用途的二极管。

解释

二极管的特性

二极管是一种将电压由某一方向施加其上时有电流流通，而从另一方向施加电压就没有电流流动这样的具有整流作用(rectification property)的元件。为制作二极管，可有将p型半导体与n型半导体相结合以及将半导体与金属结合两种方法。不论哪种结合，其电流、电压特性，都如图4.7所示。二极管的符号如图4.8所示。

电流是从图4.8所示符号的左侧向右侧流，将左侧称为阳极(anode)、右侧称为阴极(cathode)。

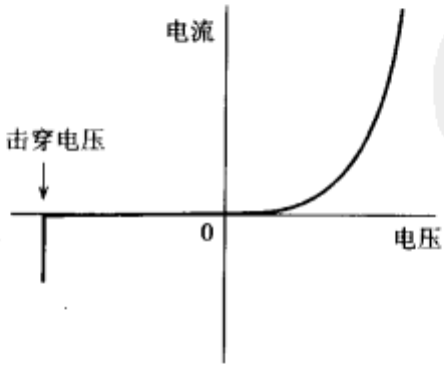


图4.7 二极管的电流、电压特性



图4.8 二极管的符号

pn结二极管

当将p型半导体与n型半导体像图4.9这样结合到一起时，n型半导体中的多数载流子电子便会扩散到p型半导体，而p型半导体的多数载流子空穴则扩散到n型半导

扩散

体。其结果造成在结的附近 p 型半导体中留有带负电的受主离子，在 n 型半导体中留有带正电的施主离子，由于这些杂质离子的作用产生电场如图 4.9(c)所示，使各种多数载流子的注入停止，达到平衡状态。在产生电场的区域中，由于载流子受电场力的作用而向外移动，故载流子不能存在于此，人们将这个区域称为**耗尽层**(depletion layer)。

耗尽层

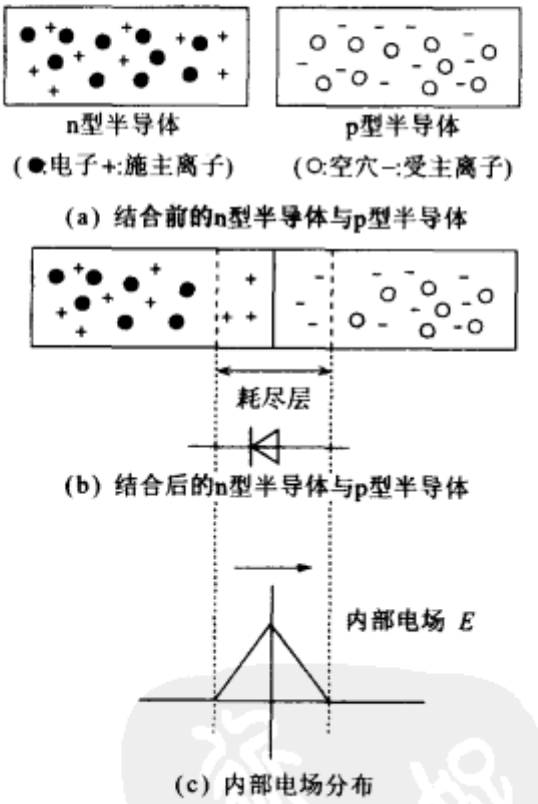


图 4.9　pn 结的原理

当以 p 型半导体侧为正、n 型半导体侧为负施加电压时，因为由外加电压产生的电场方向与杂质离子产生的电场方向相反，使电场强度减小。因此，便有从 n 型半导体向 p 型半导体流入电子，从 p 型半导体向 n 型半导体流入空穴，形成电流流动。电子与空穴的运动方向虽然相反，但因电子的电荷为负、空穴则为正，故电流方向相同。这样，人们称电流流动的方向为正方向(forward)。此外，将与电流方向一致的外加电压称为**正向电压**(forward bias)，将按此方向流动的电流称为**正向电流**(forward current)。

正向电压
正向电流

与上述情况相反，若以 n 型半导体侧为正、p 型半导体侧为负施加电压，则由于外加电压产生的电场与杂质离子产生的电场方向相同，故电场增大。因此，使多数载流子不能运动，没有电流流动。这种电流不能流动的方向称为反方向(reverse)。

肖特基二极管与欧姆结

将金属与半导体相结合也能制成二极管。但是，并不是所有的金属与半导体结合后都能成为二极管，要根据由**逸出功**(work function)所决定的特性来确定。所谓逸出功，就是从物质表面取走 1 个电子所需给予的最少能量。

逸出功

若将逸出功比 n 型半导体大的金属与半导体相结合，则作为 n 型半导体的多数载流子的电子就由半导体侧向金属侧流动，因此，在 n 型半导体中残留带正电荷的施主离子，由此离子与金属中的电子产生内部电场。当以金属侧为正、半导体侧为负施加电压时，内部产生的电场减小，从 n 型半导体向金属中流入电子，结果形成电流流动。若使金属侧为负、半导体侧为正施加电压，则内部产生的电场强度增大，结果使电流不能流动。因此，将逸出功比 n 型半导体大的金属与半导体结合能成为具有整流特性的二极管，这样的二极管称为**肖特基二极管**(schottky diode)。如果将逸出功比 n 型半导体小的金属与半导体相结合，则电子会从金属流入半导体侧，产生与上述相反的电场。然而若是对这个结施加金属侧为正、半导体侧为负的电压，或施加与此相反的电压，都会有电流流动，称这种结为欧姆结(Ohmic contact)。

肖特基二极管

在 p 型半导体的情况下，将逸出功比半导体的逸出功小的金属与 p 型半导体相结合可成为肖特基二极管，与逸出功大的金属相结合则可成为**欧姆结**。

欧姆结

二极管的反偏压特性

若对二极管施加反向电压，则如图 4.7 所示，在某一电压时电流开始由 0 而急剧变大。将这种现象称为**击穿**(breakdown)，并将电流开始流动的电压称为**击穿电压**(breakdown voltage)。击穿现象可分为**齐纳击穿**(zener

击穿
击穿电压
齐纳击穿

雪崩击穿

breakdown)与**雪崩击穿**(avalanch breakdown)两种。

隧道效应

渡越

在由电阻低的半导体结合制成的二极管中，由于载流子移动而形成的耗尽层较薄，当施加反向电压时由于**隧道效应**，载流子**渡越**耗尽层而流动，电流开始急剧增长。这种现象称为齐纳击穿。

另一方面，当施加反向电压时，随着反向电压的增加，作为 p 型半导体中少数载流子的电子，受到反方向电压作用而加速，在某一电压以上被加速运动的电子将与结中 Si 的电子发生碰撞，从结中撞出飞奔的电子。这样的电子再被加速，又会与另外一个结的电子发生碰撞，使电子的数目呈雪崩式地增加。这种现象称为雪崩击穿。

一般在反偏压为 −5V 以下引起的击穿为齐纳击穿，在 −5V以上引起的击穿为雪崩击穿。此外，若温度升高则由齐纳击穿决定的击穿电压变小，由雪崩击穿决定的击穿电压增大。

二极管的种类

在二极管中有齐纳二极管和隧道二极管等具有特殊用途的二极管。

齐纳二极管

齐纳二极管

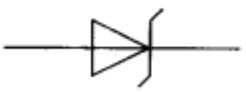


图 4.10　齐纳二极管的符号

利用齐纳击穿使电压保持一定的二极管，称为**齐纳二极管**(zener diode)，其符号如图 4.10 所示。其电流，电压特性虽说与图 4.7 相同，但击穿电压却随齐纳二极管在制造时所用半导体的电阻率的不同而有所不同，其正向电流与一般的二极管相比也是急剧增加的。依据齐纳二极管的特性，可用于稳压电路等场合。

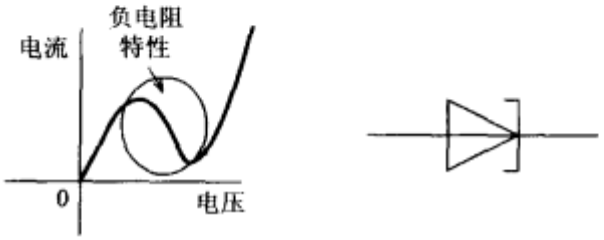
隧道二极管

图 4.11(a)表示将掺杂浓度提高以后所制作的 pn 结二极管的特性。

在这种二极管中，由于载流子移动所形成的耗尽层很薄，因此当施加正向电压时，首先由隧道效应使载流子渡越

耗尽层而流动。然而，当正向电压继续增加时，隧道电流则逐渐减少。因此，在图 4.11(a)所示中有一段尽管电压增加但电流却减小的负阻(negative resistance)特性区域。通常可以制作出具有这种特性的二极管，称为**隧道二极管**(tunneling diode)。隧道二极管的符号如图 4.11(b)所示。它是在信号发生器和开关电路中常用的二极管。

隧道二极管



(a) 隧道二极管的电流、电压特性　　(b) 隧道二极管的符号

图 4.11　隧道二极管的特性与符号

选修知识

如图 4.12 所示，在有电流流通的半导体上垂直施加磁场时，由于洛仑兹力的作用，在与电流和磁场两个方向垂直的方向上将产生电压(电场)、这种现象称为霍尔效应(Hall effect)。因为洛仑兹力对电子、空穴两者是以相同的方向施加，故根据所产生电压(电场)的方向就能判断出半导体是 n 型还是 p 型。此外，由于所产生的电压与磁场强度成正比，故还可利用霍尔效应制作能测磁场强度的传感器供使用。

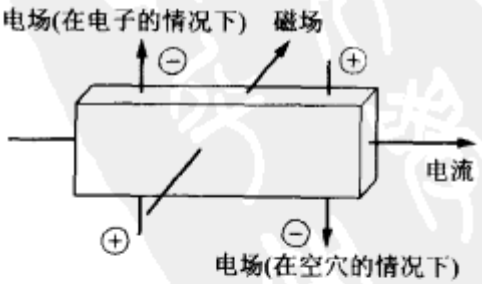


图 4.12　霍尔效应

4　双极晶体管

要　点

双极晶体管包括 npn 型晶体管与 pnp 型晶体管两类，它们的电流方向是不同的。双极晶体管的工作原理基于开关作用和电流放大作用，晶体管的特性可用 h 参数来表示。

解　释

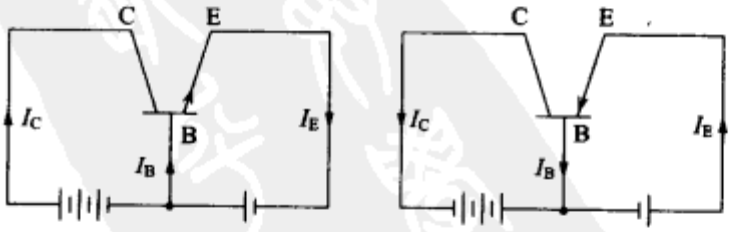
双极晶体管
场效应晶体管

1948 年，晶体管作为真空管的换代产品以点接触型晶体管而诞生。晶体管在以放大信号为主要作用而使用时，大致分为**双极晶体管**（bipolar transistor）和**场效应晶体管**（FET：field effect transistor）两类。下面主要介绍双极晶体管。

双极晶体管的构造

集电极
基极　发射极

双极晶体管有 npn 型与 pnp 型两种。其电路如图 4.13 所示。晶体管有**集电极**（C：collector）、**基极**（B：base）和**发射极**（E：emitter）。图中箭头的方向表示电流的方向，对 npn 型晶体管是由集电极流向发射极、由基极流向发射极；对 pnp 型晶体管则正相反，是由发射极流向集电极、由发射极流向基极。通常，在 npn 型晶体管中是按对基极、发射极为负、集电极为正施加电压以进行工作。即在发射极-基极之间使 pn 结为正向偏置，基极-集电极之间为反向偏置。对于 pnp 型晶体管，其电压的极性则与上述情况相反。



(a) npn型晶体管　　(b) pnp型晶体管

图 4.13　双极晶体管的电路

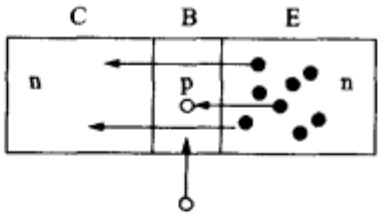
基区
发射区　集电区

晶体管的构造如图 4.14 所示。由图可见，虽然可以看作是由两个 pn 结二极管连接而成，但在晶体管内是将**基区**做得很薄，使**发射区**的电阻比**集电区**的电阻低得多。在晶体

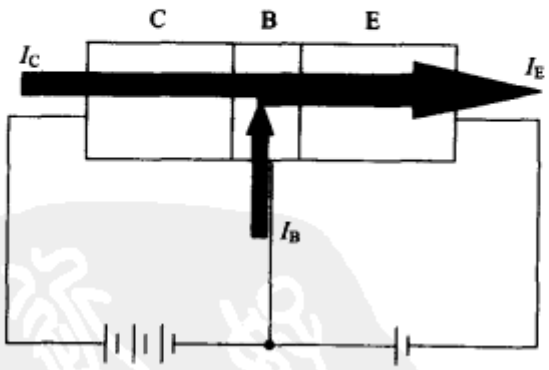
管中，由于基区很薄，所以在 npn 型晶体管的情况下，由于正向偏置的作用从发射区向基区流入多数载流子(电子)，并向集电区渡越，在集电结上外加的反向电压作用下到达集电极。但是，流入基区的多数载流子(电子)并不是全部都跑到集电区去了，而是有少量的载流子(电子)在基区与该区(p型区)的多数载流子(空穴)复合从而消失。于是，在基区多数载流子(空穴)的数量减少，为了弥补这种状况便形成基极电流流动。综上所述，**发射极电流**(I_E)、**基极电流**(I_B)、**集电极电流**(I_C)之间存在下列关系：

发射极电流
基极电流
集电极电流

$$I_E = I_C + I_B \tag{4.6}$$



(a) npn型晶体管的构造



(b) 在npn型晶体管中电流的流动

图 4.14 npn 型晶体管的构造与电流的流动

双极晶体管的工作原理

双极晶体管的特性之一如图 4.15 所示。双极晶体管的工作原理基于以下两种作用。

开关作用

如果没有基极电流，便没有集电极电流(开断状态即 cut-off 状态)。当基极有电流时，便有集电极电流(导通状

态即 on 状态)。因此,根据基极电流的设置情况可使晶体管具有开关作用。

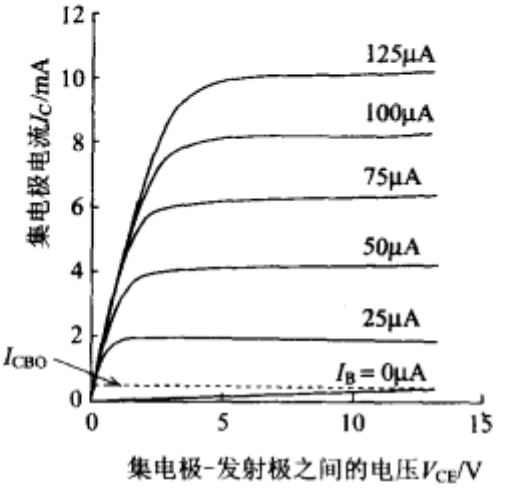


图 4.15　晶体管特性示例(发射极接地)

电流放大作用

当集电极-发射极之间的电压(V_{CE})达到 0.5V 以上时,集电极电流与 V_{CE} 无关,可由下式表示。通常,h_{FE} 为几十以上的数值。

$$I_C = h_{FE} I_B \tag{4.7}$$

晶体管的 h 参数

若将晶体管看作图 4.16 所示四端网络,则电压 v_1、v_2,电流 i_1、i_2 之间存在下列关系(对发射极接地电路,电压 v_1 相当于基极-发射极间电压,v_2 相当于集电极-发射极间电压;电流 i_1 为基极电流,i_2 为集电极电流)。

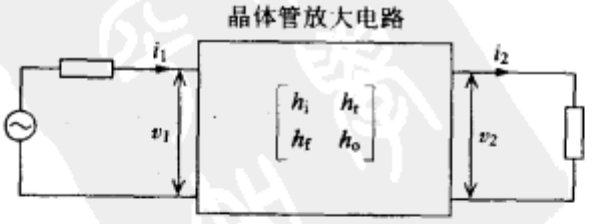


图 4.16　晶体管的 h 参数

$$v_1 = h_i i_1 + h_r v_2 \tag{4.8}$$

$$i_2 = h_f i_1 + h_o v_2 \tag{4.9}$$

或者

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_i & h_r \\ h_f & h_o \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

系数 h_i、h_r、h_f、h_o 称为 h 参数(h parameter)。其各自的下标表示 input、reverse、forward、output 之意，各参数的含义如下：

h_i：输入阻抗 $|Z_i|$（$v_2=0$ 即输出端短路）

$$h_i = Z_i = \left(\frac{v_1}{i_1}\right)_{v_2=0} \tag{4.11}$$

h_r：电压反馈系数(电压增益 A_v 的倒数)

（$i_1=0$ 即输入端开路）

$$h_r = \frac{1}{A_v} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)_{i_1=0} \tag{4.12}$$

h_f：电流增益 A_i（$v_2=0$ 即输出端短路）

$$h_f = A_i = \left(\frac{i_2}{i_1}\right)_{v_2=0} \tag{4.13}$$

h_o：输出导纳(输出阻抗 Z_o 的倒数)

（$i_1=0$ 即输入端开路）

$$h_o = \frac{1}{Z_o} = \left(\frac{i_2}{v_2}\right)_{i_1=0}$$

此外，还采用了下标 b 与 e，以表示基极接地、发射极接地的区别(h_{ib}、h_{rb}、h_{fb}、h_{ob} 与 h_{ie}、h_{re}、h_{fe}、h_{oe})。

双极晶体管的参数

在设计制作晶体管放大电路时，必须考虑所用晶体管的参数。这里对有关型号规格表中给出的参数值简要说明如下。

(1) 极限参数

如果使用晶体管超过了以下所给出的极限参数值，就会使晶体管受到破坏，不能正常工作。

① $V_{(BR)CBO}$(集电极-基极反向击穿电压)。表示发射极开路时，在集电极-基极之间所能施加的最高反向电压。

② $V_{(BR)CEO}$(集电极-发射极反向击穿电压)。表示基极开路时，在集电极-发射极之间所能施加的最高反向电压。

③ I_C(集电极最大电流)。表示在集电极中所能流过的最大电流。如果超过此电流值,则发射极接地的电流放大系数 h_{FE} 对集电极电流就为非线性,因而输出信号会产生失真。

④ P_C(集电极最大功耗)。由施加到集电极上的电压和集电极电流的乘积决定的功率会在集电结转变成热。晶体管因对温度敏感,故随温度上升有可能受到破坏。集电极最大功耗就是不发生过热所能允许消耗的集电极最大功率。

⑤ T_j(最大结温)。表示晶体管正常工作时 pn 结的最高温度。

(2) 电气特性

一般,表示 25℃时晶体管的电气特性。

① I_{CBO}(集电极-基极间反向饱和电流)。表示当发射极开路时,在集电极-基极之间施加反向电压所出现的漏电流数值。它的数值越小越好(见图 4.15)。

② f_α(截止频率($f_{\alpha b}$;$f_{\alpha e}$))。表示当电流放大系数 h_f 比低频时的值减少 3dB 时的频率。采用下标 b 与 e,为的是区别基极接地、发射极接地(设以 P_1 为输入,P_2 为输出,则定义衰减 N(dB)为 $N=-20\log(P_1/P_2)$)。

③ f_T(特征频率)。表示当发射极接地的电流放大系数 h_{fe} 为 1(=0dB)时的频率。

选修知识

按照习惯,在处理直流信号时使用大写文字表示;处理交流信号时使用小写文字表示。例如,h_{FE} 表示在直流信号时的电流增益,h_{fe} 表示在交流信号时的电流增益。同理,对于电流(有 I 与 i)、电压(有 V 与 v)也有大写文字与小写文字的区别。

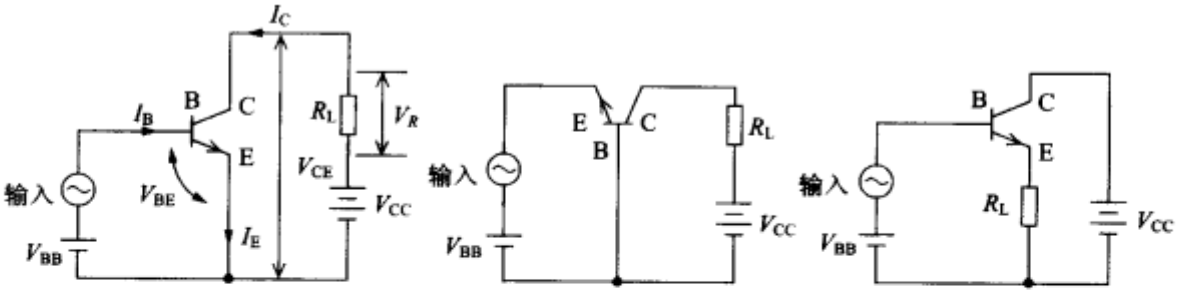
5　晶体管的放大作用

要　点

使用晶体管有三种接地电路，其中发射极接地电路的电流放大系数最大，作为放大电路是最常用的电路。发射极接地电路的工作可用负载线来分析。应当注意，在发射极接地电路中信号是被反相放大的。

解　释

在对信号进行放大时，由于晶体管有 3 个端子，可使输入为一端，输出为一端，作为公共端的接地端为一端。图 4.17 表示 npn 型晶体管的各种接地电路。



(a) 发射极接地电路　　(b) 基极接地电路　　(c) 集电极接地电路

图 4.17　npn 型晶体管的各种接地电路

发射极接地电路

发射极接地电路

图 4.17(a)表示**发射极接地电路**(grounded emitter circuit)，亦即基极为输入、集电极为输出的电路。图 4.18(a)表示基极-发射极间电压 V_{BE} 与基极电流 I_B 的特性图，图 4.18(b)则是集电极-发射极间电压 V_{CE} 与集电极电流 I_C 的关系。输出的集电极电流(I_C)相对于输入的基极电流(I_B)之比，称为发射极接地的**电流放大系数** h_{FE}，其值约为几十至几百大小。

电流放大系数

$$I_C = h_{FE} I_B \tag{4.14}$$

发射极接地电路，因其电流放大系数最大，故作为放大电路用得最多。

发射极接地电路的工作情况，可用图 4.18(b)中的**负载线**来分析。图中的负载线可如下作出。当基极电流(输

负载线

截止状态

入)为 0 时,发射极电流几乎不流通(**截止状态**)。因此,负

负载电阻

载电阻两端的电压 V_R 为:

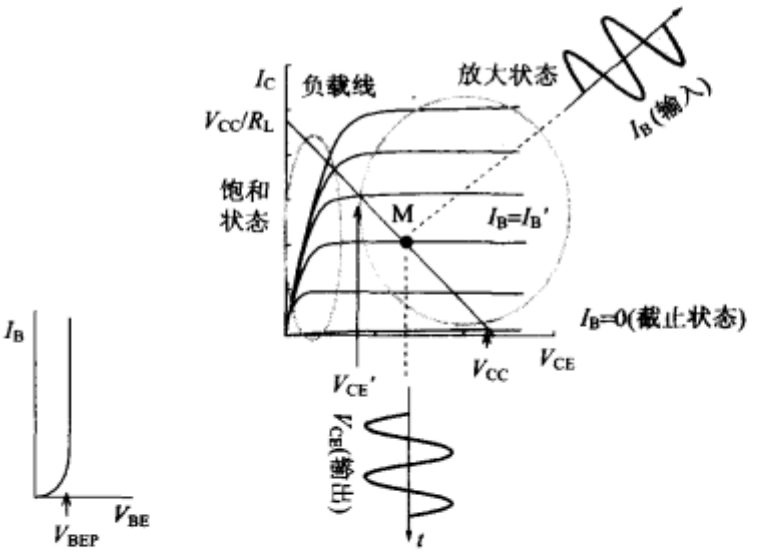
$$V_R = R_L I_C = 0 \tag{4.15}$$

此外,因

$$V_{CC} = V_{CE} + V_R \tag{4.16}$$

故有

$$V_{CC} = V_{CE}$$



(a) V_{BE}-I_B特性　　(b) V_{CE}-I_C特性

图 4.18　发射极接地晶体管的特性

因此,负载线上 $I_B = 0$ 的曲线与电压为 V_{CC} 的垂线相交的交点为一点。当基极电流为 I'_B 时,集电极电流为 $I'_C = h_{FE} \times I'_B$,此时的集电极-发射极电压 V'_{CE} 为:

$$V'_{CE} = V_{CC} - R_L I'_C = V_{CC} - R_L h_{FE} I'_B \tag{4.17}$$

因此,负载线上 $I_B = I'_B$ 的曲线与 V'_{CE} 的垂线相交的交点为另一点。将此二点连接起来,就得到负载线。在 $V_{CE} = 0$ 时,由式(4.17)可知 $I_C = V_{CC}/R_L$ 即负载线与 I_C 轴相交的交点坐标。如图所示,根据由负载电阻所决定的范围内输入的基极电流的振幅,就可以得出被放大的输出电压(放大状

工作点

态)。这时,基极电流的中心点(直流成分)M 点,称为**工作点**。

饱和状态

当输出电压 V_{CE} 小时，因集电极电流与 V_{CE} 成正比但几乎与 I_B 无关（**饱和状态**），故在这种状态下，可以认为整个晶体管相当于一个电阻。

由式(4.17)可知，若基极电流增大，输出电压 V_{CE} 减小。即若以与 $\cos\omega t$ 成正比的信号为输入，则与 $\cos(\omega t+180°)$ 成正比的信号为输出，其相位差 180°，反相。因此，又称为**反相放大**(inverting amplifier)。

反相放大

基极接地电路

基极接地电路

图 4.17(b)为**基极接地电路**(ground edbase circuit)，即发射极为输入、集电极为输出的电路。输出的集电极电流相对于输入的发射极电流之比，称为基极接地的电流放大系数 h_{FB}，其值接近 1 而小于 1。换言之，几乎没有电流放大作用。但是，在基极接地时，由于发射极侧的输入阻抗相对于集电极侧的输出阻抗为小，故能够有较大的电压放大倍数。另外，因输出对输入难以有反馈影响这一点，在高频放大电路中也有应用。图 4.19 表示基极接地电路的基极-集电极间电压 V_{BC} 与集电极电流 I_C 之间的关系示例。

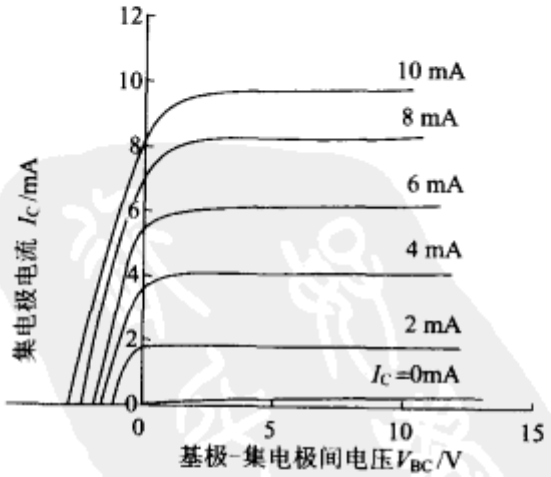


图 4.19 晶体管的特性示例(基极接地)

基极接地的电流放大系数 h_{FB} 与发射极接地的电流放大系数 h_{FE} 具有下列关系：

$$h_{FE}=\frac{h_{FB}}{1-h_{FB}} \tag{4.18}$$

在发射极接地的电路中，输出的相位相对于输入为反

相；而在基极接地电路，其相位则相同。

集电极接地电路

集电极接地电路

图 4.17（c）为**集电极接地电路**（grounded collector circuit），即基极为输入、发射极为输出的电路。集电极接地电路，因其输入阻抗大、输出阻抗小，故作为缓冲器在连接高阻抗的信号源与低阻抗的负载时使用，作为放大电路一般不使用。

6 偏置电路

要 点

在发射极接地电路中作为使输出稳定的电路有偏置电路。在偏置电路中，通常使用固定偏置电路、自给偏置电路（电压反馈偏置电路）、电流反馈偏置电路三种电路。

解 释

在发射极接地电路中，若信号以图 4.20(a)所示的 L 点或 H 点为工作点，就会超过由负载线所决定的范围输入信号，从而使输出电压如图 4.20(b)所示那样发生失真。

因此，在放大小信号时，有必要预先给输入外加一定的直流电压，以便能有一定的基极电流（偏置电流）流通。利用一个电源电压使工作稳定的电路称为偏置电路。

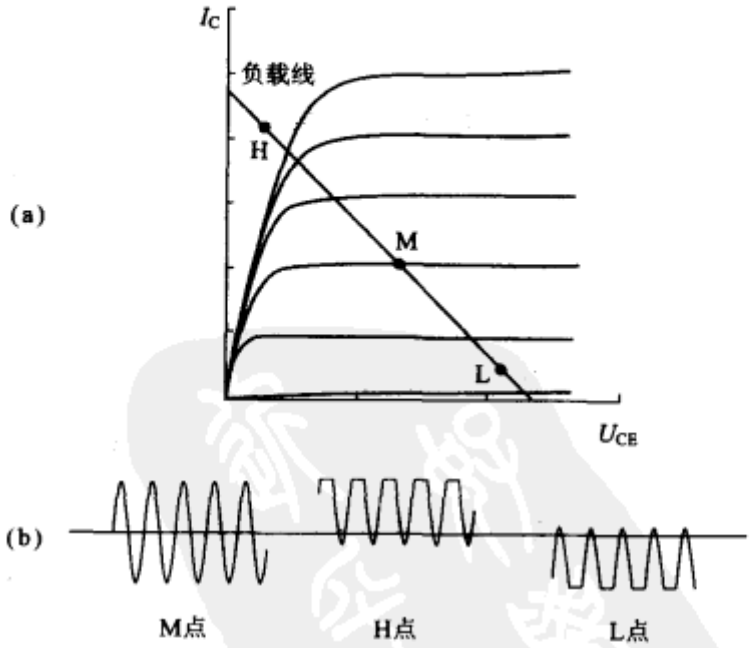


图 4.20 由工作点决定的输出波形失真

固定偏置电路

固定偏置电路

固定偏置电路如图 4.21 所示。令电源电压为 V_{CC}，则由偏置电阻 R_B 决定预先输入一偏置电流 I_{BO}。若使 V_{CC} 与 R_B 按下式设定，则工作点将会成为负载线的中心。

$$I_{BO}=\frac{V_{CC}-V_{BE}}{R_B}\approx\frac{V_{CC}}{R_B}=\frac{V_{CC}}{2R_C} \tag{4.19}$$

若 V_{BE} 比 V_{CC} 甚小，则 I_B 便成为一定的固定数值。固定偏置电路虽是最简单的偏置电路，但当温度变化时却是不稳定的电路。

自给偏置电路

图 4.22 表示自给偏置电路。在此电路中，预先流有电流 I_{BO}。**自给偏置电路**又称电压反馈偏置电路，其温度特性比固定偏置电路优越。

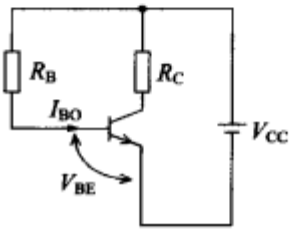


图 4.21　固定偏置电路

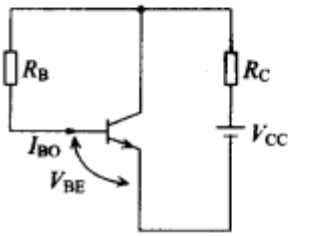


图 4.22　自给偏置电路

$$I_{BO}=\frac{V_{CC}-V_{BE}-R_C I_C}{(R_B+R_C)}\approx\frac{V_{CC}}{(R_B+R_C)} \tag{4.20}$$

电流反馈偏置电路

电流反馈偏置电路

图 4.23 所示为采用**电流反馈偏置电路**的 *CR* 耦合电路，在放大低频小信号时常用。电路中接入的电容是为了仅让信号的交流成分通过，而让直流成分不能通过（称为耦合电容或旁路电容）。电阻 R_1、R_2 是为分配电源电压而接入。此电路中基极与接地间的电压 V_A 为：

$$V_A=\frac{R_1}{(R_1+R_2)}V_{CC} \tag{4.21}$$

它与输入无关，是一定值。

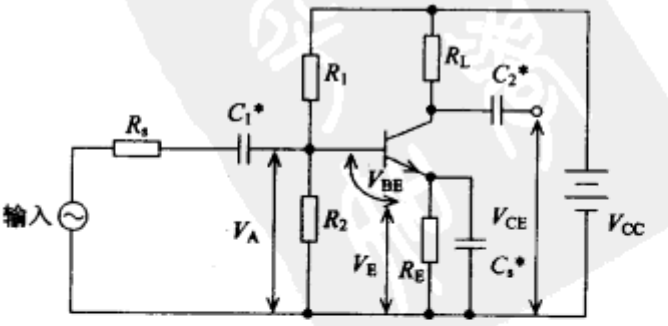


图 4.23　采用电流反馈偏置电路的 *CR* 耦合电路

电阻 R_E 是为稳定电路而接入的，其上的电压 V_E 为：

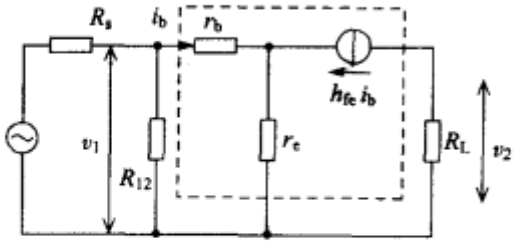
$$V_E=(I_C+I_B)R_E \tag{4.22}$$

基极-发射极间的电压 V_{BE} 为：

$$V_{BE}=V_A-V_E \tag{4.23}$$

这时，尽管输入一定，但 V_{CC} 减小时，V_A 将随着 V_{CC} 的减小而减小。如果没有电阻 R_E，V_A 的减小会直接造成 V_{BE} 的减小，使输出不稳定。但若有了电阻 R_E，由式(4.22)可知由于集电极电流减小，电压 V_E 也减小，再根据式(4.23)基极-发射极间电压 V_{BE} 的变化就小了，使输出稳定。一般，R_E 使用 0.5～3kΩ 范围内的电阻。

图 4.24 为图 4.23 表示的电路的等效电路。图中，用虚线围起来的部分是双极晶体管的交流等效电路。此等效电路由基区电阻 r_b、发射区电阻 r_e 以及由基极电流 i_b 控制的电流源 $h_{fe}i_b$ 构成。



$$R_{12}=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}$$

图 4.24 电流反馈偏置电路的等效电路

利用图 4.24 可推出：

输入阻抗 Z_i 为：

$$Z_i=\frac{R_1R_2R_{ie}}{R_1R_2+R_1R_{ie}+R_2R_{ie}}$$

$$R_{ie}=r_b+(1+h_{fe})r_e \tag{4.24}$$

电压增益 A_v 为：

$$A_v=-\frac{h_{fe}R_L}{r_b+(1+h_{fe})r_e} \quad \text{（负号表示相位相反）} \tag{4.25}$$

输出阻抗 Z_o 为：

$$Z_o=\infty \tag{4.26}$$

7　场效应管

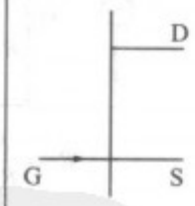
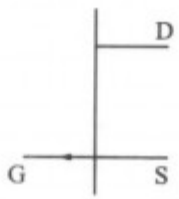
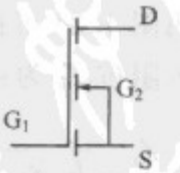
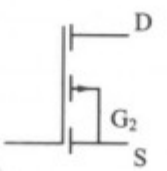
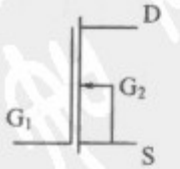
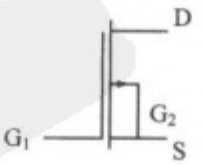
要　点

场效应管(即场效应晶体管,Field Effect Transistor,缩写为 FET)包括结型 FET(J-FET:Junction-gate FET)与 MOS-FET(Metal-Oxide-Semiconductor 金属-氧化物-半导体场效应管,又称绝缘栅场效应管)。在结型 FET 中,当漏极电压达到夹断电压以上值时就有一定的漏极电流流动,电流值随负的栅极电压增加而减小。在 MOS-FET 中,当施加以数值为门槛电压以上的栅极电压时,便有漏极电流流动,随着栅压增加,电流值也增大。MOS-FET 按照门槛电压的正、负,分为增强型与耗尽型。

解　释

场效应管的符号及种类如表 4.2 和图 4.25 所示。结

表 4.2　FET 的符号

		n 沟道	p 沟道
结构 FET (J-FET)			
MOS-FET	增强型		
	耗尽型		

型 FET(J-FET 即 Junction-gate FET)有栅极(G)、源极(S)和漏极(D)。MOS-FET(Metal-Oxide-Semiconductor FET)虽有两个栅极(G_1、G_2),但一般多将 G_2 与源极相接,故与结型 FET 同样也为 3 端元件。



n 沟道

p 沟道

图 4.25 FET 的种类

结型 FET

为理解图 4.26 表示的结型 FET 工作的接线图,见图 4.27 所示的 J-FET(n 沟道)工作原理。电流由漏极向源极方向流动。p 沟道 J-FET 的接线图电压极性则相反。在 p 沟道 J-FET 中,电流由源极流向漏极。

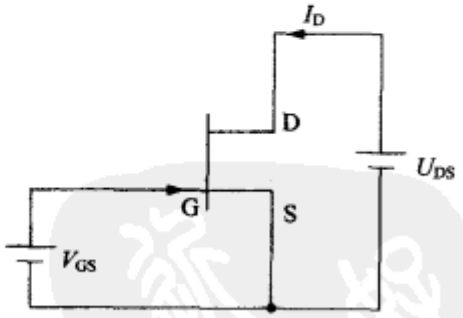
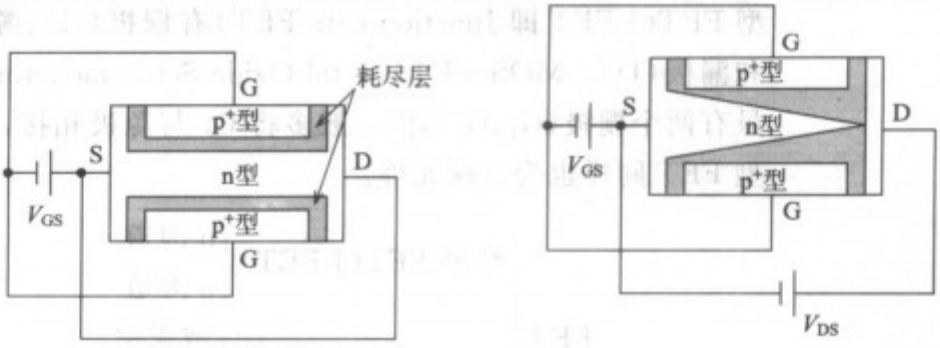


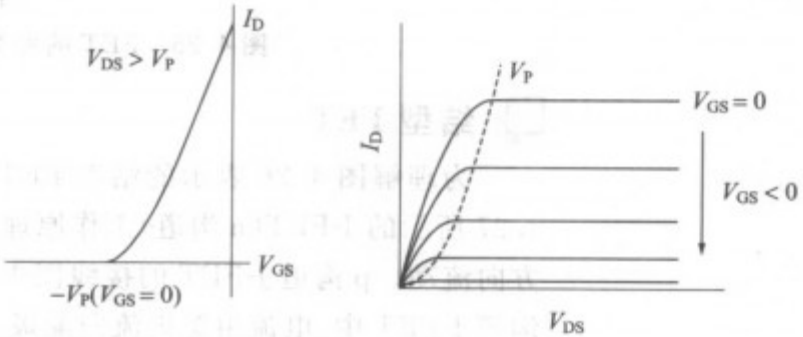
图 4.26 结型 FET(n 沟道)的接线图

J-FET 的特性示例如图 4.28 所示。J-FET 不能在栅极电压 V_{GS} 为正的范围内($V_{GS}>0$)使用。V_{GS} 为负,相当于栅-源、栅-漏间的 pn 结为反向偏置,在栅极与源极、栅极与漏极之间存在耗尽层。随着漏极电压 V_{DS} 的增大,漏-栅极间的耗尽层宽度增宽,以至如图 4.27(b)所示达到了整个沟道(n 型层)中。这时漏极电流成为饱和。将耗尽层与沟道的宽度相同时的电压称为夹断电压 V_P。



(a) $V_{DS}=0$　　(b) $V_{DS}=V_P$

图 4.27　结型 FET(n 沟道)的工作原理



(a) V_{GS}-I_D特性　　(b) V_{DS}-I_D特性

图 4.28　结型 FET 的特性

当缓慢增大电压 V_{GS}(外加负电压)时,因为由 V_{GS} 而产生的耗尽层宽度加大,使漏极电流为一定的夹断电压而缓慢减小,同时饱和漏极电流也相应减小。当 V_{GS} 的绝对值与 $V_{GS}=0$ 时的夹断电压 V_P 相等时,由于耗尽层与沟道的宽度相同,故不论 V_{DS} 如何,漏极电流始终为 0。

MOS-FET

图 4.29 所示为说明 MOS-FET(Metal-Oxide-Semiconductor FET)工作的接线。在 MOS-FET(n 沟道)中,相对于源极,栅极、漏极上均施加以正的电压。电流为由漏极流向源极。MOS-FET 与双极晶体管或 J-FET 不同,在栅-源极间、栅-漏极间几乎没有电流流通。p 沟道的 MOS-FET 的接线图,其电压的极性与上述相反。在 p 沟道的 MOS-FET 中,电流是由源极流向漏极。

图 4.30 表示 MOS-FET(n 沟道)的工作原理。在 n 沟道 MOS-FET 中,是在 p 型半导体衬底上制作一个 n 型的源极和漏极部分。栅极是在 p 型半导体衬底上制作一层绝缘膜(硅氧化膜),在它上面再制作一层金属膜而形成的。即使在栅极上施加正的栅极电压 V_{GS},由于在衬底与电极之间有绝缘膜,故没有电流流动。

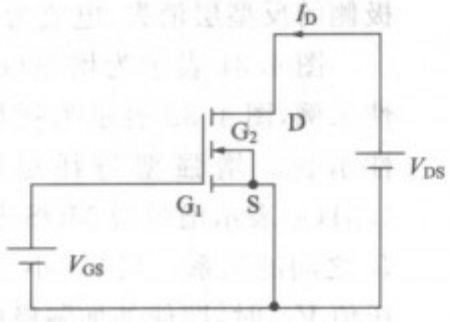
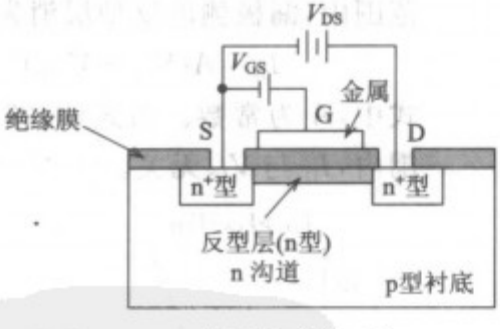
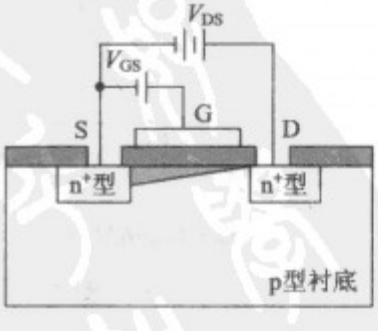


图 4.29 MOS-FET(n 沟道)的接线图



(a) $V_{DS}=0, V_{GS}>V_{TH}$



(b) $V_{DS}=V_{GS}-V_{TH}$

图 4.30 MOS-FET(n 沟道)的工作原理

但是,当栅极上施加某一数值以上的电压时,p 型半导体中的电子受外加电场作用聚集于表面,在 p 型衬底表面电

子浓度比空穴浓度大，于是便在表面形成一个由 p 型向 n 型反方向的**反型层**(n 沟道)。为形成反型层所需要的最小电压称为**门槛电压**(threshold voltage)V_{TH}。由于绝缘膜下面的反型层的作用，使同为 n 型的源极与漏极得以沟通，当在源-漏极向外加电压 V_{DS} 时，便有漏极电流 I_D 流通。若使 V_{DS} 增大，则栅-漏极间电压会比 V_{TH} 小，如图 4.29(b)所示漏极侧的反型层消失，电流为一定值。

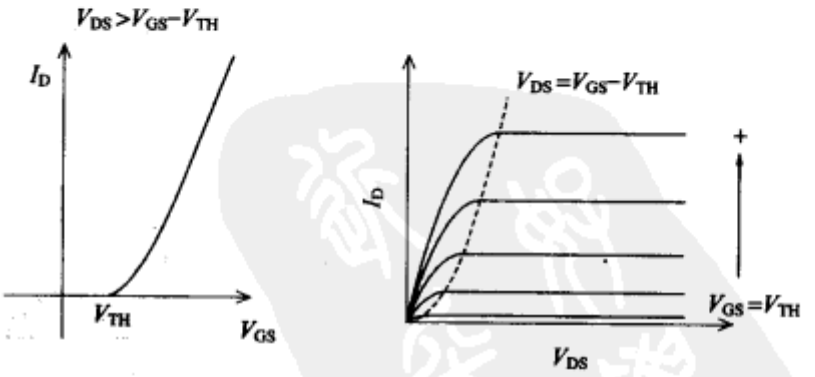
反型层

门槛电压

图 4.31 表示为增强(enhancement)型 MOS-FET 的特性示例，图 4.32 表示为耗尽(depletion)型 MOS-FET 的特性示例。增强型与耗尽型 FET 的接线并无不同。图 4.31(a)表示增强型 MOS-FET 的栅极电压 V_{GS} 与漏极电流 I_D 之间的关系。当 V_{GS} 小于为形成反型层所必需的门槛电压值 V_{TH} 时，即使外加漏极电压 V_{DS}，也无漏极电流流动。若 V_{GS} 大于 V_{TH}，就开始有漏极电流流动。在 $V_{DS}>V_{GS}-V_{TH}$ 的范围内，漏极侧的反型层消失，漏极电流 I_D 为：

$$I_D=A(V_{GS}-V_{TH})^2 \tag{4.27}$$

式中，A 为常数。由式(4.27)可知，在 $V_{DS}>V_{GS}-V_{TH}$ 的范围内，I_D 与 V_{DS} 无关。

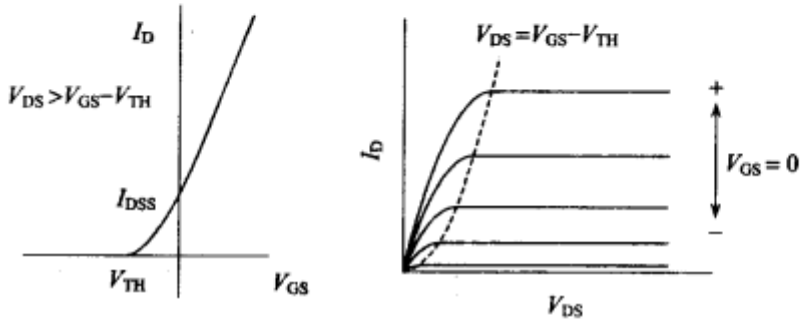


(a) V_{GS}-I_D特性　　(b) V_{DS}-I_D特性

图 4.31　MOS-FET(增强型)的特性

图 4.32(a)所示为耗尽型 MOS-FET 的栅极电压 V_{GS} 与漏极电流 I_D 的关系。增强型与耗尽型一个很大的不同就是，门槛电压 V_{TH} 在增强型中为正电压，而在耗尽型中则为负。因此，对耗尽型 MOS-FET 即便不加栅极电压，只要施加漏极电压 V_{DS}，也会有漏极电流 I_D。此外，漏极电流也能

由负的漏极电压来控制。与增强型 MOS-FET 同样，I_D 与 V_{DS} 也服从式(4.27)的关系，增强型又称正常关断(normally-off)型，耗尽型又称正常接通(normally-on)型。MOS-FET 是在数字集成电路中作为表示通、断的双值开关使用甚多的元件。



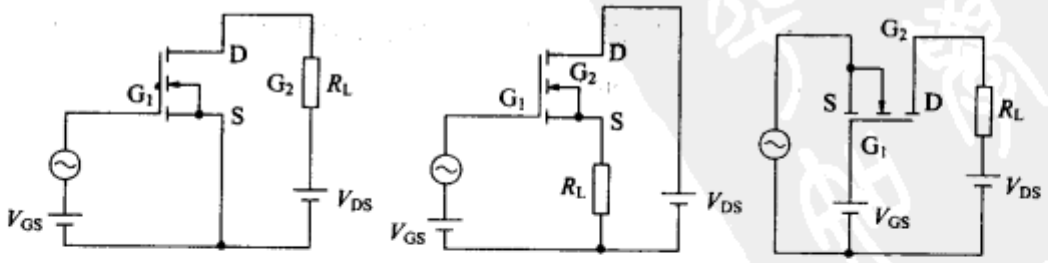
(a) V_{GS}-I_D特性　　(b) V_{DS}-I_D特性

图 4.32　MOS-FET(耗尽型)的特性

使用 FET 的放大电路

使用 FET(n 沟道增强型 MOS-FET)的 3 种基本放大电路如图 4.33 所示。其中图 4.33(a)所示为源极接地放大电路，即栅极为输入、漏极为输出的电路。图 4.33(b)所示为漏极接地放大电路，即栅极为输入、源极为输出的电路。图 4.33(c)所示为栅极接地放大电路，即源极为输入、漏极为输出的电路。这些电路分别相当于双极晶体管的发射极接地(对应**源极接地**)、集电极接地(对应**漏极接地**)、基极接地(对应**栅极接地**)电路。此外，有关负载曲线的作法、工作点的决定等，也可参见第 4～5 节。

源极接地
漏极接地
栅极接地



(a) 源极接地电路　　(b) 漏极接地电路　　(c) 栅极接地电路

图 4.33　MOS-FET(n 沟道增强型)的各种接地电路

FET 的参数

这里对 FET 的型号规格表中给出的有关参数作简要说明。

(1) 极限参数

① V_{GDS}(漏-源短路、栅-漏极间最大电压)。主要作为 J-FET 时使用,是在漏-源极间短路时,在栅-漏极间所能施加的最大电压。

② V_{DSX}(漏-源极间最大电压)。主要作为 MOS-FET 时使用,表示在漏-源极间所能施加的最大电压,在 MOS-FET 中,由于栅-漏极间的耐压相当于制作元件时的氧化膜的耐压,其与电路没有直接关系,故相对于 V_{GDS} 较多使用 V_{DSX}。

③ V_{GSO}(栅-源极间最大电压)。主要作为 MOS-FET 时使用,表示在栅-源极间所能施加的最大电压。

④ I_G(最大栅极电流)。在使用 J-FET 时,它表示当栅极电压 V_{GS} 为正($V_{GS}>0$)时在栅极中所能流动的最大电流。在使用 MOS-FET 时,取代 I_G,以漏极电流 I_D 的最大值来表示的场合居多。

(2) 电气特性

① I_{GSS}(栅极截止电流)。漏-源极间短路,在栅-源极间施加负的电压时所能流动的漏电流。在使用 J-FET 时,为元件工作中所流动的栅极电流。在使用 MOS-FET 时,是通过氧化膜流动的漏电流,与 J-FET 的数值相比非常小。

② I_{DSS}(饱和漏极电流)。是当栅-源极间短路时($V_{GS}=0$)所流动的漏极电流(在耗尽型 MOS-FET 中,I_{DSS} 如图 4.32 所示)。

8 各种电子器件

要点

在电子器件中，有能够控制大电流、用于电力控制或电力变换的晶闸管，将光变换成电的受光器件（光电导器件、太阳电池）以及将电变换成光的发光器件（发光二极管、激光器）等。

解释

晶闸管

晶闸管（thyristor）是由 3 个以上的 pn 结制作的开关器件的总称，包括**反向关断三端晶闸管**（reverse blocking triode thyristor，semiconductor controlled rectifier，SCR）、**三端双向晶闸管**等各种器件。晶闸管是能够控制大电流的器件，在电力控制或电力变换中使用。

反向关断三端晶闸管

三端双向晶闸管

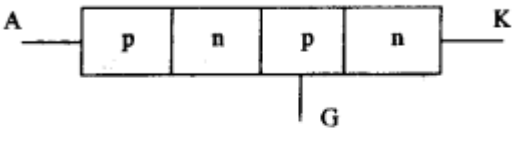
反向关断三端晶闸管的构造、符号及特性如图 4.34 所示。将控制极在 n 型半导体上的 SCR 称为 n 型控制极晶闸管，将其在 p 型上的 SCR 称为 p 型控制极晶闸管。在晶闸管中，相对于阴极（K）在阳极（A）上施加正电压。电流是从阳极流向阴极。由于中心的 pn 结上承受反向电压，故在 V_A 很小时，几乎没有电流（off 状态）。当 V_A 增大时，由于外侧 pn 结上所加正向电压的作用，载流子向当中流入，从而形成电流的流动（on 状态）。从 off 状态转变为 on 状态时的电压称为**转折电压**（break over voltage）。一旦有电流开始流动，除非使它非常小，就一直会有电流流动。保持 on 状态的最小电流称为**保持电流**（holding current），此时的电压称为**保持电压**（holding voltage）。SCR 因控制端有控制极电流，故应设计其转折电压尽可能小。

转折电压

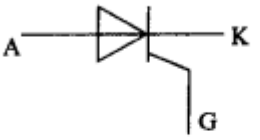
保持电流

保持电压

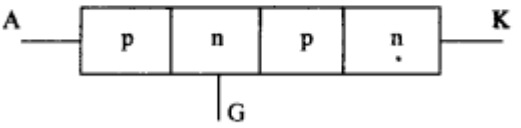
三端双向晶闸管系由两个反向的 SCR 相连接构成。其特性与符号如图 4.35 所示。在 SCR 中虽然有因反向偏置造成的击穿现象，导致反向电流流动，但在三端双向晶闸管中却不论 V_T 为正、负，均显示出具有相同的这种特性。



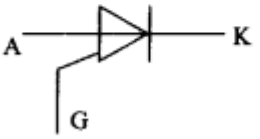
(a) p控制极晶闸管的构造



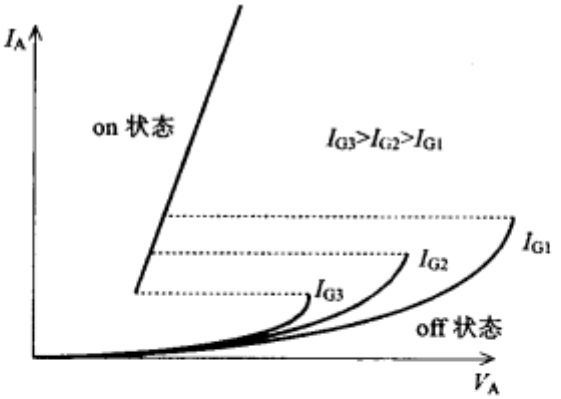
(b) p控制极晶闸管的符号



(c) n控制极晶闸管的构造

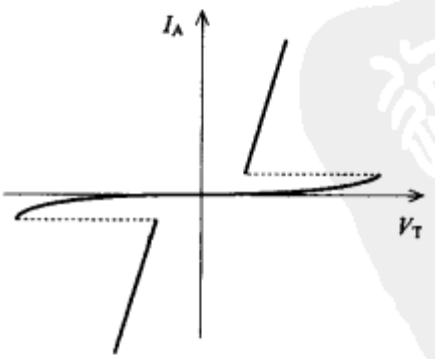


(d) n控制极晶闸管的符号

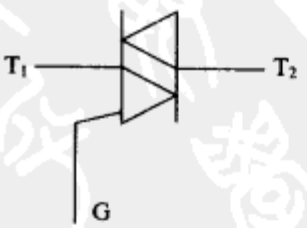


(e) 晶闸管的特性

图 4.34　晶闸管的构造、符号及特性



(a) 三端双向晶闸管的特性



(b) 三端双向晶闸管的符号

图 4.35　三端双向晶闸管的特性与符号

受光器件

(1) 光电导器件(photoconductive cell)

光电导效应

将半导体因吸收光而产生电子-空穴对的现象称为**光电导效应**。一旦吸收光而产生了电子-空穴对,就会使载流子浓度增大,因而半导体的电阻率减小。将这种利用光电导效应把光转变为电气信号的器件称为**光电导器件**。其构造很简单,只要在半导体上作上两个欧姆性电极即可。典型的光电导器件是CdS。图 4.36 所示为光电导器件的符号。

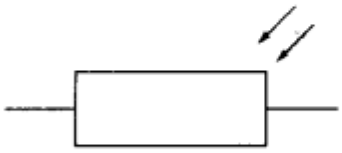


图 4.36 光电导器件的符号

光电导器件

(2)太阳电池(Solar cell)

将光照射到 pn 结二极管或肖特基二极管上,就会在耗尽层内产生电子-空穴对,产生的电子-空穴对在内部电场作用下向耗尽层以外流去。因此,在移动的载流子作用下,若使结的两端短路,就有电流流动(短路光电流 I_{SC},short circuit current),若使其开路则有电压(开路端电压 V_{OC},open circuit voltage)产生。太阳电池的电流-电压特性如图 4.37 所示。在使用**太阳电池**时,若与合适的负载相连接,则图 4.37 所示的斜线区表示可供出的最大功率 P_m。太阳电池的能量变换效率 η 是输入光能 P_{in} 与 P_m 之比,即

太阳电池

$$\eta=\frac{P_m}{P_{in}}$$

图 4.38 所示为太阳电池的符号。

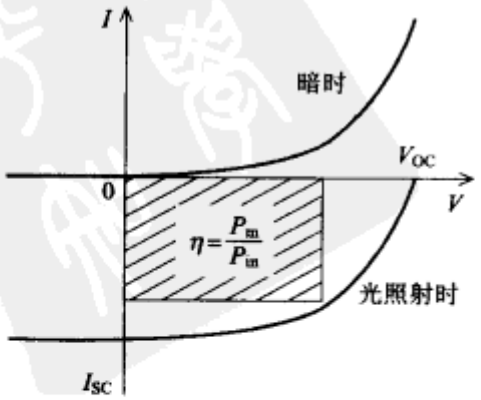


图 4.37 太阳电池的电流-电压特性

(3) 光电二极管(photo diode)

光电二极管与太阳电池均是利用相同的原理。由于光的照射而产生的电子-空穴对在内部电场作用下,向耗尽层以外流动,从而形成电流。利用这种现象将光变换成电气信号的器件就是**光电二极管**。

光电二极管

为了改善光电二极管的反应速度,有在 pn 结间插入本征区域(i 区域)构成的 pin 光电二极管和利用雪崩效应即便对微弱的光也能高灵敏地感应出的雪崩式光电倍增二极管(avalanche photo diode)。图 4.39 表示为光电二极管的符号。



图 4.38　太阳电池的符号

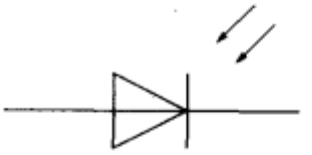


图 4.39　光电二极管的符号

发光器件

(1) 发光二极管(light emitting diode,LED)

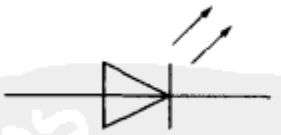


图 4.40　LED 的符号

发光二极管

当 pn 结二极管或肖特基二极管中有电流流动时,在耗尽层内一旦有电子与空穴复合,则电子就会失去其所具有的动能,变换成光,利用此原理制成的器件就是**发光二极管**。所产生光的波长与半导体的能带隙等有关。但是,并不是所有的半导体都能制成发光二极管,也有部分动能不能变换为光而变换成热的半导体。表 4.3 所列为发光二极管中可利用的半导体及其发光波长。再有,图 4.40 表示为发光二极管的符号。

(2) 激光器(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ,LASER)

自然发射

受激发射

LED 的发光为**自然发射**(spontaneon emission),所发射的光的方向是零散的,相位也不一致。与此相对应,将相位一致的发光称为**受激发射**(simulated emission)。这种由

激光器

受激发射而发射光的器件就是**激光器**。激光器虽有各种结构但其构造示例则如图 4.41 所示。简言之，是将发光部分的半导体(活性层，active layer)插入能带隙不同的半导体(包层，cladding layer)当中，以使载流子向活性层内注入，使电子与空穴连续地复合，从而产生光。

表 4.3 半导体材料与发光中心波长

材料	发光中心波长/nm	备注
ZnSe	465	蓝
GaN	490	
SiC	490	
GaP	556, 570	绿
GaAsP	587	黄绿
GaAlP	634	
GaAlAs	670～850	红
GaAs	880～950	红外
InGaAs	1060	
InGaAsP	～1550	

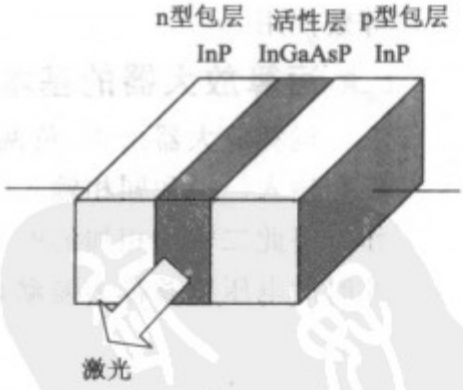


图 4.41 激光器的构造示例

选修知识

将受光器件与发光器件组合起来构成的器件为光耦合器(optical coupler)。它具有强力的抗干扰特性，以使电气上绝缘。此外，将受光器件与发光器件分离开再结合到一起的器件为光断路器(optical interruptor)，可作为光电开关。

9　运算放大器

要　点

运算放大器(operational amplifier)是理想的放大器，它是一种集成电路(IC)，此 IC 能够构成由外部元件组合具有各种功能的电路。从加、减运算或微、积分等的模拟运算到声频、视频、传感器等各种电路中都有广泛应用。

解　释

理想放大器

理想放大器的条件如下：

电压增益　① **电压增益**为∞。

输入阻抗　② **输入阻抗**为∞。

输出阻抗　③ **输出阻抗**为 0。

频率特性　④ **频率特性**从直流 DC 到无穷大(频率)是平坦的。

输入电压　⑤ **输入电压**为 0 时，输出电压为 0。

实际的运算放大器虽然不是理想放大器，但差不多可以等效使用。

运算放大器的基本工作原理

运算放大器由正、负两电源驱动，如图 4.42 所示，具有反相输入(－)和同相输入(＋)两个输入端及一个输出端，可作为将此二输入相加的电压差进行放大的**差动放大器**使用。此时的电压增益称为**差动增益**，其值非常高(理想情况下为∞)。

差动放大器

差动增益

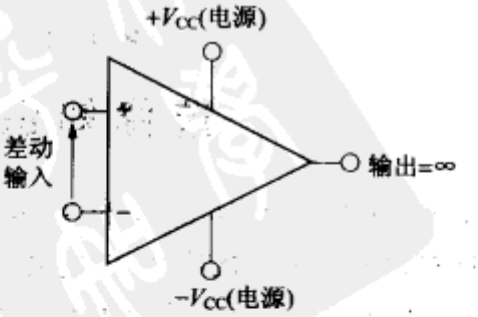


图 4.42　差动增益

此外，像图 4.43 这样将两个输入端施加同相相等的电

压时，由于电压差为0，输出就非常小（理想情况下为0），这时的电压增益称为**同相增益**。

同相增益

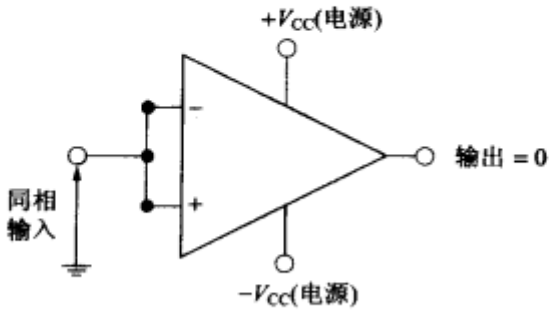


图 4.43 同相增益

通常，将此两种电压增益之比（差动增益/同相增益）定义为**共模抑制比**（Common Mode Rejection Ratio，CMRR）。但是，不能将有这样高的电压增益的放大器直接使用，因此一般采用如图 4.44 所示的将输出的一部分反相反馈到输入的**负反馈电路**（negative feed back circuit，NFB）所构成的**闭环电路**。

共模抑制比

负反馈电路

闭环电路

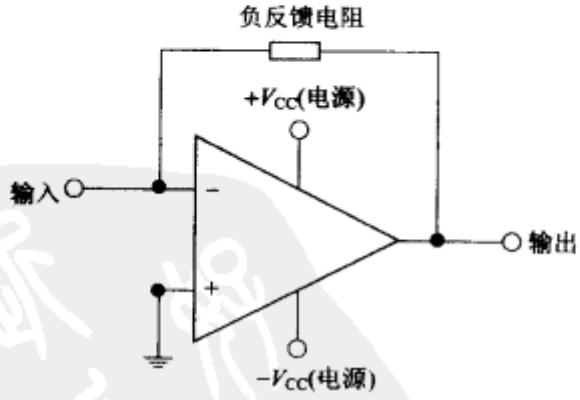


图 4.44 负反馈

运算放大器电路的分析方法

在分析运算放大器的工作时，掌握以下两点将有助于理解：

① 由于负反馈电路的作用，当带有大的反馈时输出会变成非常小，因此根据理想放大器的条件（①电压增益∞），输入的电压差（差动输入）就变成接近于0。换言之，可以认为两个输入端为短路，这被称为**虚短路**（imaginary

虚短路

short，假想短路）。

② 由理想放大器的条件（②输入阻抗∞）可知，由于运算放大器的输入阻抗非常高，故可认为没有输入信号电流流动。

反相放大电路

反相放大电路

反馈电阻

图 4.45 所示的**反相放大电路**（inverting amplifier circuit）是输出信号电压的极性与输入信号电压相反（反相）的放大电路。图中，R_1 为输入电阻，R_f 为**反馈电阻**。

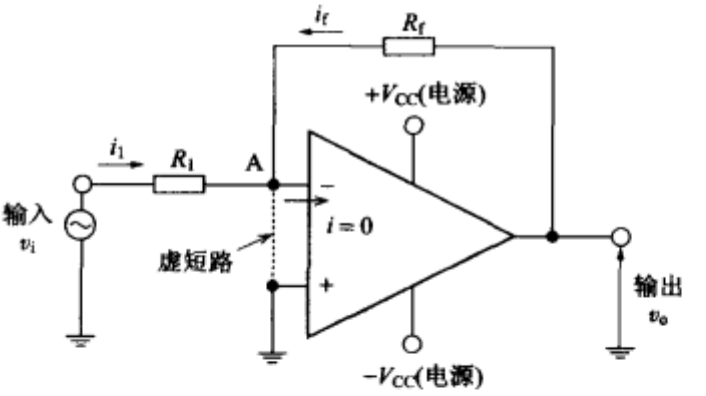


图 4.45　反相放大电路

根据虚短路的条件，反相输入端（－端）的电压与同相输入端（＋端）的电压相等，A 点的电压为 0V，因此在 R_1 中的电流为 $i_1=v_i/R_1$，R_f 中的电流为 $i_f=v_o/R_f$。

另外，再由运算放大器没有输入信号电流的条件可知，在 A 点有

$$i=\frac{v_i}{R_1}+\frac{v_o}{R_f}=0$$

因此，反相放大电路的电压增益 A_{uf} 为：

$$A_{uf}=\frac{v_o}{v_i}=-\frac{R_f}{R_1}$$

可以看出，反相放大电路的电压增益仅取决于外部元件的数值。此外，若采用阻抗来取代电阻 R_1、R_f，上述关系也成立。这里符号为负是表示输出信号电压的极性与输入信号电压相反，如图 4.46 所示。

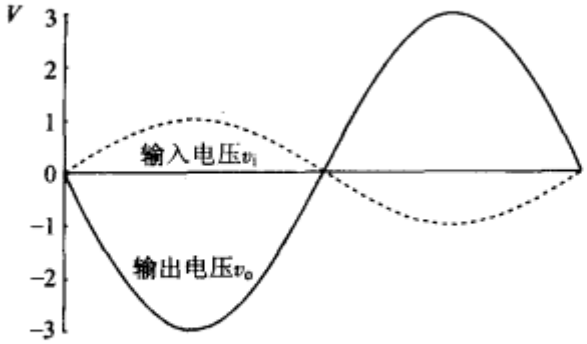


图 4.46 反相放大电路的输入与输出

同相放大电路

同相放大电路

图 4.47 所示的**同相放大电路**(non-inverting amplifier circuit)是输出信号电压的极性与输入信号电压相同(同相)的放大电路。图中,R_1、R_2 为输入电阻,R_f 为反馈电阻。

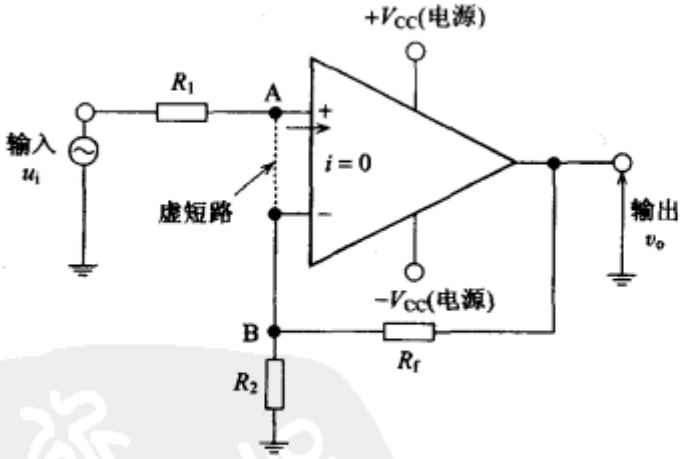


图 4.47 同相放大电路

同相输入端
反相输入端

根据虚短路的条件,A 点的**同相输入端**(+端)的电压与 B 点的**反相输入端**(−端)的电压$[R_2/(R_2+R_f)]\cdot v_o$ 相等。再由运算放大器没有输入信号电流这一条件可知,它与输入信号电压 v_i 也相等,因此有

$$v_i=\frac{R_2}{R_2+R_f}\cdot v_o$$

故同相放大电路的电压增益 A_{uf} 为:

$$A_{uf}=\frac{v_o}{v_i}=\frac{R_2+R_f}{R_2}=1+\frac{R_f}{R_2}$$

由此可知，同相放大电路的电压增益也和反相放大电路同样，仅由外部元件的数值决定。另外，输出信号电压的极性则与输入信号电压相同，如图 4.48 所示。

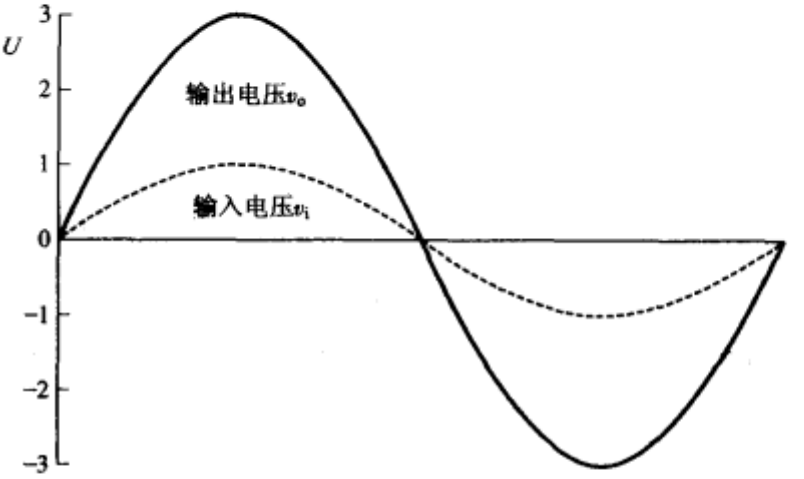


图 4.48　同相放大电路的输入与输出

例 题

[1] 试计算如图 4.49 和图 4.50 所示的运算放大电路的放大倍数 A_{uf}。

[答] 图 4.49 所示的运算放大电路为反相放大电路，故

$$A_{uf}=-\left(\frac{100\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega}\right)=-10\text{ 倍}$$

图 4.50 所示运算放大电路为同相放大电路，故

$$A_{uf}=1+\left(\frac{100\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega}\right)=11\text{ 倍}$$

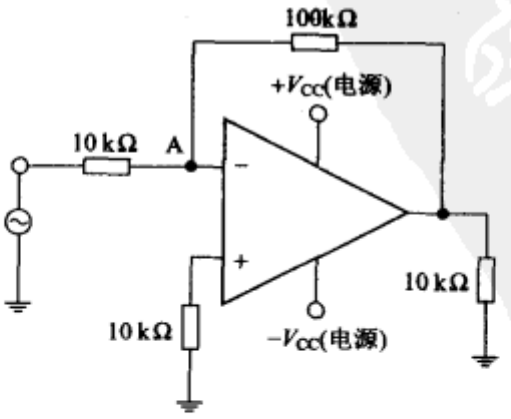


图 4.49　运算放大电路(一)

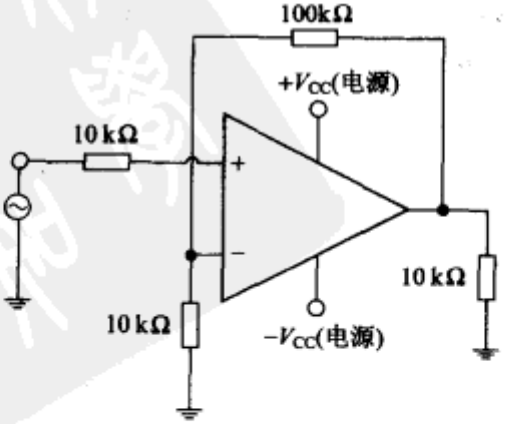


图 4.50　运算放大电路(二)

加法运算电路

加法运算电路

图 4.51 所示为**加法运算电路**，是将多个信号电压相加，从而获得输出的电路。

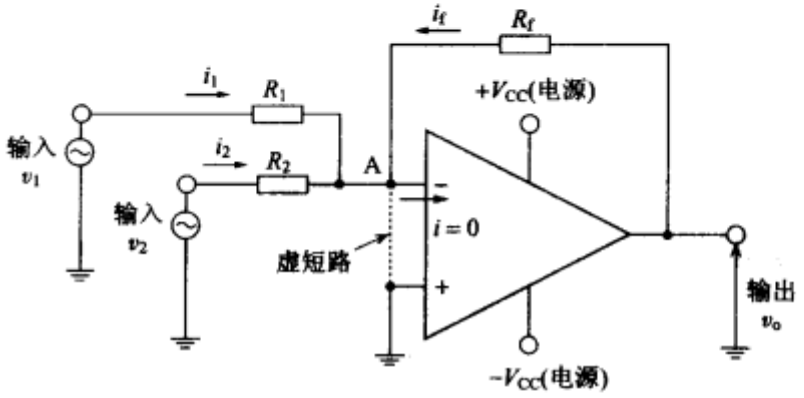


图 4.51 加法运算电路

根据虚短路的条件可知，反相输入端(－端)的电压与同相输入端(＋端)的电压相等，A 点的电压为 0V，因此 R_1 中的电流为 $i_1=v_1/R_1$，R_2 中的电流为 $i_2=v_2/R_2$，R_f 中的电流为 $i_f=v_o/R_f$。

再由运算放大器没有输入信号电流的条件可知，在 A 点有

$$i=\frac{v_1}{R_1}+\frac{v_2}{R_2}+\frac{v_o}{R_f}=0$$

因此有

$$v_o=-\left(\frac{v_1}{R_1}+\frac{v_2}{R_2}\right)\cdot R_f$$

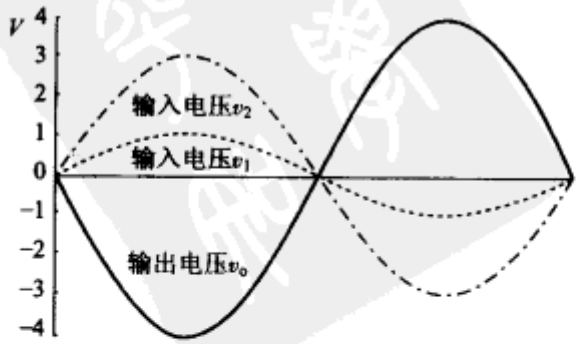


图 4.52 加法运算电路的输入与输出

若令 $R_1=R_2=R_f=R$，则有

$$v_o=-\left(\frac{v_1}{R}+\frac{v_2}{R}\right)\cdot R=-(v_1+v_2)$$

由此可知，将输入信号相加以后得到输出。另外，由于构成的是反相放大电路，故输出与输入的极性相反，如图 4.52 所示。

减法运算电路

减法运算电路

图 4.53 所示的**减法运算电路**，是将多个信号电压进行减法运算，从而获得输出的电路。

根据虚短路的条件可知，A 点的反相输入端(－端)的电压，与 B 点的同相输入端(＋端)的电压$[R_3/(R_2+R_3)]\cdot v_2$相等，因此电流 i_1 与 i_f 为：

$$i_1=\left(v_1-\frac{R_3}{R_2+R_3}\cdot v_2\right)\Big/ R_1$$

$$i_f=\left(v_o-\frac{R_3}{R_2+R_3}\cdot v_2\right)\Big/ R_f$$

再由运算放大器没有输入信号电流的条件可知，在 A 点有

$$i=i_1+i_f=0$$

若令上式中 $R_1=R_2=R_3=R_f$，则因 $i_f=-i_1$，故有

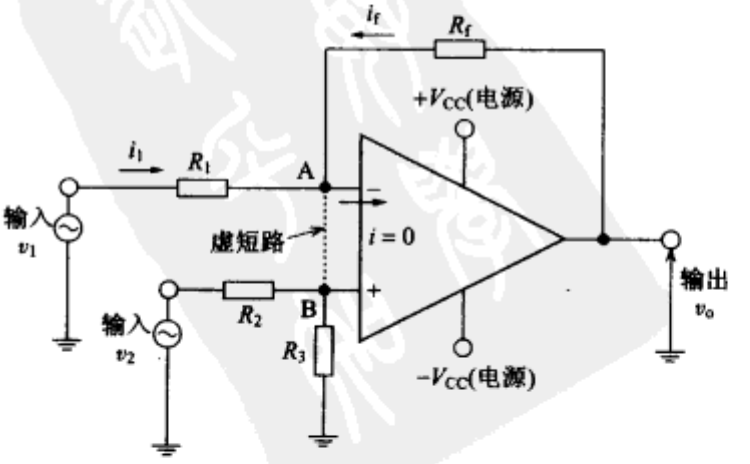


图 4.53　减法运算电路

$$\left(v_o-\frac{R}{R+R}\cdot v_2\right)\Big/R=-\left(v_1-\frac{R}{R+R}\cdot v_2\right)\Big/R$$

换言之，有

$$v_o=v_2-v_1$$

由此可知，如图 4.54 所示由同相输入端(＋端)的输入信号减去反相输入端(－端)的输入信号之后得到了输出。

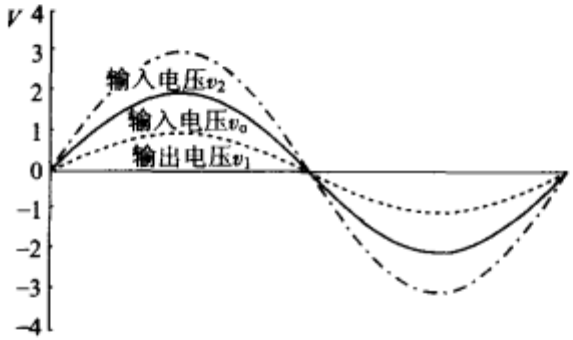


图 4.54 减法运算电路的输入与输出

电压比较电路

电压比较电路

电压比较电路(voltage comparator circuit)是将输入电压与基准电压相比较为大还是小的电路。

如图 4.55 所示，它是将反相放大电路的负反馈去掉成开环状态的基本电路，在同相端(＋端)施加基准电压，在反相端(－端)施加信号电压。其工作过程是，当输入信号电压 v_i＞基准电压 v_s 时进行差动放大，由于放大倍数非常大，使最大反相输出为 $v_o=-V_{CC}$。同理，当输入信号电压 u_i＜基准电压 V_s 时，有最大同相输出为 $v_o=+V_{CC}$。这样，就能够将输入信号电压与基准电压进行比较之后的结果输出。

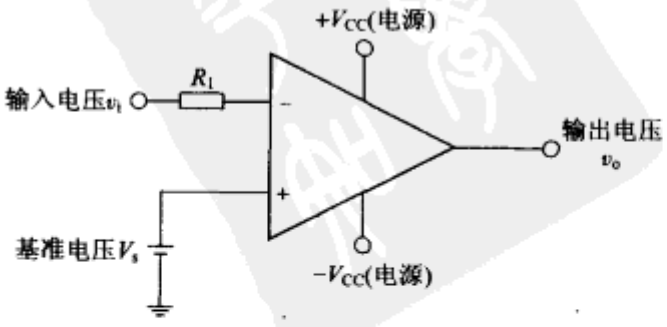


图 4.55 电压比较器电路

相关知识

◆ 运算放大器的补偿

理想放大器，在输入电压为 0 时输出电压也为 0V。但是，在实际的运算放大器电路中，在输入电压为 0V 时仍有很小的输出电压。将这个电压换算成输入，称之为输入补偿电压。为了消除这个输入补偿电压，可采用输入补偿电压调整电路，以在输入电压为 0V 时调整输出电压为 0V。一般地，如图 4.56 所示，由于运算放大器有补偿调整端子，可在此处外接可变电阻器进行补偿调整，使输出电压为 0V。

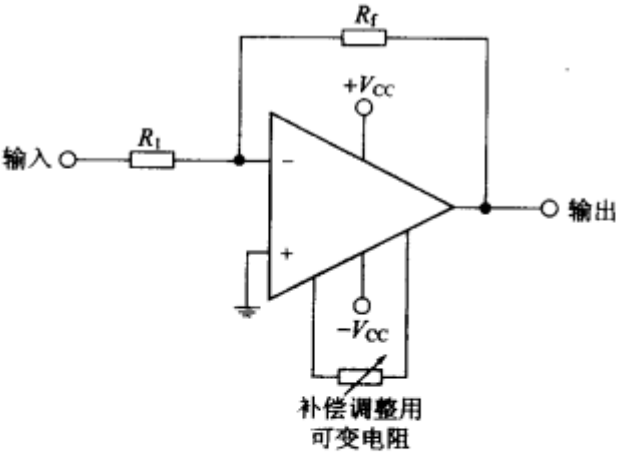


图 4.56　补偿调整

10　串联谐振电路

要　点

串联谐振电路，是能够在具有各种频率成分的电气信号之中，仅选定具有特定频率的电气信号并将此信号电压放大的电路。例如，收音机或电视机的接收机中所使用的选择某一播送台的调谐电路。

解　释

电路工作原理

图 4.57 所示是电阻器、线圈和电容器串联连接的电路，称为串联谐振电路。当此电路与 $e=E\cos(2\pi ft)$ 的交流电源相连时，电路中会有电流 $i_s=I_s\cos(2\pi ft-\phi_s)$ 流动。式中，电流的振幅 I_s 与相位 ϕ_s 由下式给出，它们与交流电压的频率 f 有关：

$$I_s=\frac{E}{\sqrt{R^2+\left(2\pi fL-\frac{1}{2\pi fC}\right)^2}}$$

$$\phi_s=\arctan\left(\frac{2\pi fL-\frac{1}{2\pi fC}}{R}\right)$$

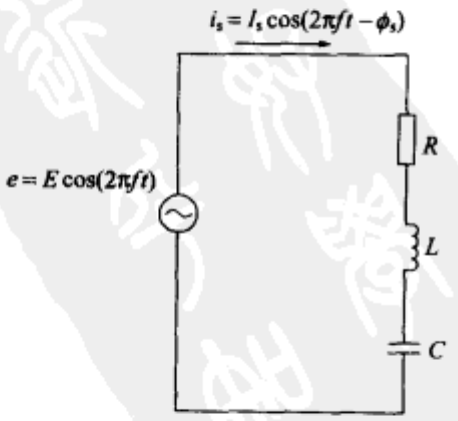


图 4.57　串联谐振电路

在图 4.57 所示的电路中，电容器和线圈两端的电压分别为

$$e_C=\frac{1}{2\pi fC}I_s\sin(2\pi ft-\phi_s)$$

$$e_L=-2\pi fLI_s\sin(2\pi ft-\phi_s)$$

而电阻器两端的电压则为

$$e_R=RI_s\cos(2\pi ft-\phi_s)$$

电路的特性

今令电源电压的振幅 E 一定，而使频率 f 变化，则电流的振幅 I_s 如图 4.58 所示变化，在满足 $2\pi fL-\frac{1}{2\pi fC}=0$ 的条件的频率时，具有最大值 $I_s^r=E/R$。这种在某一频率下物理量具有峰值的现象就是谐振，若设此时的频率为 f_r，则 f_r 由下式给出，称为谐振频率：

$$f_r=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

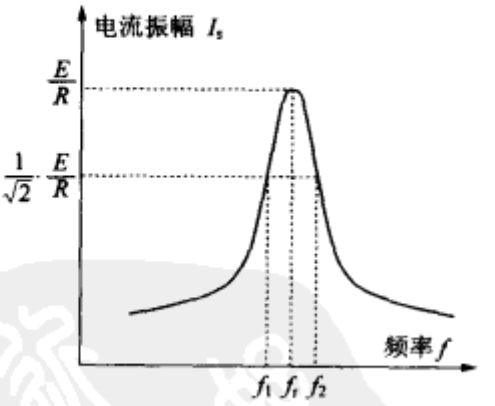


图 4.58　串联谐电路的特性

在 $f=f_r$ 时，$e_C^r=QE\sin(2\pi f_r t)$，$e_L^r=-QE\sin(2\pi f_r t)$。即有振幅为电源电压 Q 倍的电压施加到电容器与线圈上。这里，Q 由下式给出，称为 Q 值：

$$Q=\sqrt{\frac{L}{C}}\frac{1}{R}$$

Q 值可认为是表示谐振曲线的尖锐程度的一个物理量。在图 4.58 中，如令电流振幅为谐振时振幅的 $1/\sqrt{2}$（在考虑功率时为 1/2）时的两个频率分别为 f_1、f_2，则可以证明有

$$Q=\frac{f_r}{f_2-f_1}$$

因此，可以看出 Q 值越大，表示谐振曲线宽度的 f_2-f_1 与谐振频率 f_r 相比更为小，则曲线突起就尖锐。

这种仅对特定频率的信号给予响应的谐振电路，其特性可用于在各种频率成分构成的信号之中仅选出特定频率的信号。

例 题

[1] 设图 4.57 所示电路中，电阻器的 $R=560(\Omega)$，电容器的 $C=47(\mathrm{pF})$，线圈的 $L=10(\mathrm{mH})$，试计算谐振频率 f_r 与 Q 值，并求 f_1 与 f_2。此外，再导出为使谐振频率为 $f_r+f_2-f_1$，如电容器的电容变化为 C'，此 C' 是多少？

答 由 $f_r=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 知 $f_r=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{10\times10^{-3}\times47\times10^{-12}}}$

$$=232\times10^3(\mathrm{Hz})$$

由 $Q=\sqrt{\dfrac{L}{C}}\dfrac{1}{R}$ 知 $Q=\sqrt{\dfrac{10\times10^{-3}}{47\times10^{-12}}}\dfrac{1}{560}=26$

因为 Q 值为 26，令 $Q=\dfrac{f_r}{f_2-f_1}=26$，得 $f_2-f_1=232/26=8.9\ (\mathrm{kHz})$

可以看出 $f_1=f_r-(f_2-f_1)/2$，$f_2=f_r+(f_2-f_1)/2$，所以有

$$f_1=f_r-\frac{f_2-f_1}{2}=232-\frac{8.9}{2}=228\ (\mathrm{kHz})$$

$$f_2=f_r+\frac{f_2-f_1}{2}=232+\frac{8.9}{2}=236\ (\mathrm{kHz})$$

其次，以 $f_r+f_2-f_1$ 为谐振频率，则应有 $C'=\dfrac{1}{L(2\pi)^2(f_r+f_2-f_1)^2}$，故得

$$C'=\frac{1}{L(2\pi)^2(f_r+f_2-f_1)^2}$$

$$=\frac{1}{10\times10^{-3}\times(2\pi)^2\times(232\times10^3+8.9\times10^3)^2}=43.2\ (\mathrm{pF})$$

即为所求谐振频率值。

如本例题所显示的那样，使用电容量可变的电容器能够选定所希望听的广播电台，这就是收音机选频电路的原理所在。

11 并联谐振电路

要点

并联谐振电路，是能够引起具有特定频率的电气信号电流振荡，使振幅增大的电流在回路内流动的电路。可将这种电流的能量转变成金属中的焦耳热，在可加热金属的高频加热等场合多有应用。

电路工作原理

图4.59所示为电阻器，电容器和线圈并联连接的电路，称为并联谐振电路。当将此电路与 $e=E\cos(2\pi ft)$ 的交流电源相接时，电路中流动的电流为 $i_p=I_p\cos(2\pi ft-\phi_p)$。式中，电流的振幅 I_p 与相位 ϕ_p 由下式给出，它们均与交流电压的频率 f 有关：

$$I_p=\frac{E\sqrt{R^2+4\pi^2f^2[L(1-4\pi^2f^2LC)-CR^2]^2}}{R^2+4\pi^2f^2L^2}$$

$$\phi_p=\arctan\left(\frac{2\pi f[L(1-4\pi^2f^2LC)-CR^2]}{R}\right)$$

此外，由图4.59可知，电流 i_p 分流为 $i_{p1}=I_{p1}\cos(2\pi ft-\phi_{p1})$ 与 $i_{p2}=I_{p2}\cos(2\pi ft-\phi_{p2})$。式中 I_{p1}、ϕ_{p1} 与 I_{p2}、ϕ_{p2} 由下式给出：

$$I_{p1}=\frac{E}{\sqrt{R^2+4\pi^2f^2L^2}},\phi_{p1}=\arctan\left(\frac{2\pi fL}{R}\right)$$

$$I_{p2}=2\pi fCE,\phi_{p2}=-\frac{\pi}{2}$$

电路的特性

像串联谐振电路一样，当电源的频率 f 变化时，电流的振幅 I_p 也随之发生变化，如图4.60所示，当 $f_r=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 时，电流振幅为最小值为

$$I_p^r=\frac{E}{RQ^2}\cdot\frac{1}{\sqrt{1+1/Q^2}}$$

而 $Q=\sqrt{\dfrac{L}{C}}\dfrac{1}{R}$，与在串联谐振电路中所定义的 Q 值相同。

此外，在电源频率为 f_r 时，I_{p1}^r 与 I_{p2}^r 分别为：

$$I_{p1}^r=\frac{E}{RQ}\cdot\frac{1}{\sqrt{1+1/Q^2}}$$

$$I_{p2}^r=\frac{E}{RQ}$$

当 Q 值远大于 1 时，$I_p^r=\dfrac{E}{RQ^2}$，$\phi_p^r=0$，则 I_{p1}^r、ϕ_{p1}^r 与 I_{p2}^r、ϕ_{p2}^r 分别为：

$$I_{p1}^r=\frac{E}{RQ}=QI_p,\ \phi_{p1}^r=\frac{\pi}{2}$$

$$I_{p2}^r=\frac{E}{RQ}=QI_p,\ \phi_{p2}^r=-\frac{\pi}{2}$$

换言之，I_p^r 虽然本身非常小，但在线圈或电容器中却有其 Q 倍的电流按图 4.59 所示箭头方向流动。这是由外部电源供给谐振电路具有 I_p^r 的 Q 倍振幅的电流所引起的，可认为产生了谐振。

在前节所述的串联谐振电路中，由于是具有电源电压振幅 Q 倍的电压施加到了线圈与电容器上，故串联谐振又称电压谐振。与此相对应，在本节所述的并联谐振电路中，由于是具有向电路所提供电流振幅 Q 倍的电流引起振荡，故又称电流谐振。并联谐振电路的特性如图 4.60 所示。

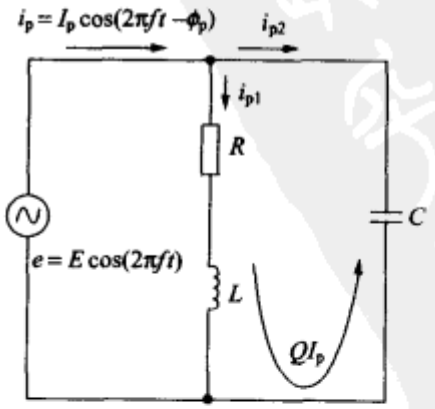


图 4.59 并联谐振电路

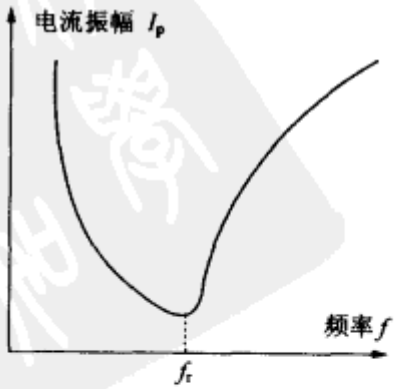


图 4.60 并联谐振电路的特性

与图 4.59 所示的并联谐振电路不同，还有电阻与电容器、线圈全部并联连接的并联谐振电路。这时，谐振频率虽同样仍为 $f_r=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$，但 Q 值却为上述的倒数，即

$$Q=\sqrt{\frac{C}{L}}R$$

研究课题

作为并联谐振电路应用之例，有高频加热。高频加热在需要将熔点高的金属放在真空中熔化等场合中广泛使用，即将金属放入强磁场中，由于磁场的作用使金属中的自由电子产生焦耳热，从而使金属熔化。由于在并联谐振电路中可有所供电流振幅 Q 倍的电流在线圈中流动，能够产生强大的磁场。利用并联谐振电路的这种特性，可以进行高频加热。

12 调幅电路

要 点

AM无线电广播是将声音或音乐等音响的信息变换成电波的振幅向空间播放。在电波的振幅上附加以信息，这称之为振幅调制(AM:Amplitude Modulation，简称调幅)，人们可从收到的电波中取出音响信息(检波)，享受电波带来的快乐。

解 释

调幅的方式

调制信号

载波

图4.61与图4.62是以任意比例尺所表示的调幅方式的模式，其中横轴为时间，纵轴为希望送出的信息和电波的振幅。图4.61上侧的波形表示希望送出信息的**调制信号** $g_s(t)$，如AM无线电广播中流行的声音信号所对应的信息。图4.61所示的下侧表示承载信息的电波，称为**载波**。载波一般可用下式表示，多采用空间传播效率高的100kHz以上的频率的电波：

$$g_c = A\sin(2\pi f_c t + \theta)$$

调幅前载波的振幅 A 是一定的，如图4.61所示。图4.62表示调幅后载波变成的已调波，它可由下式表示：

$$g_{AM}(t) = [A + g_s(t)]\sin(2\pi f_c t + \theta)$$

已调波

包络线

已调波的振幅与调制信号 $g_s(t)$ 成正比变化，表示已调波外形的**包络线**的形状，与图4.61所示上侧的调制信号相对应。由此可知，调幅就是使载波的振幅与希望送出的信息成正比而变化。

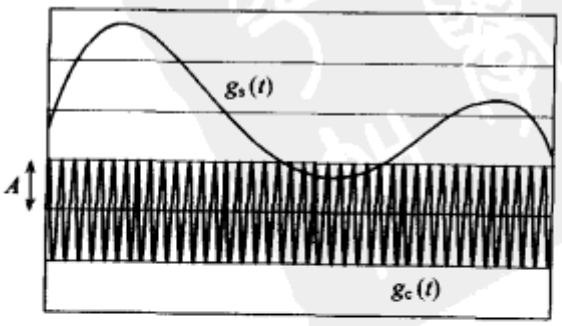


图4.61 调幅用的调制信号与载波

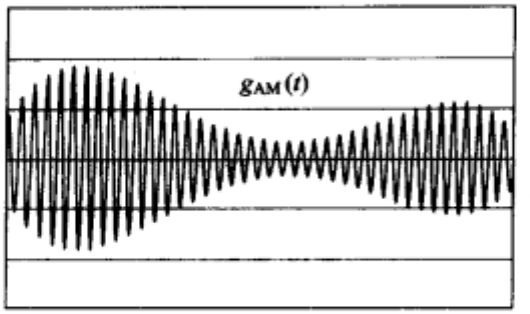


图 4.62　已调波

这里，如令调制信号 $g_s(t)$ 的振幅为 A_s，则称 $m=A_s/A$ 为**调幅指数**，它表示调制信号的振幅相对载波振幅的大小程度。举例来说，调制指数可与图像中的对比度相对应，像在雾中拍相片时图像信息不清楚的对比度低的摄影那样，调制指数小，载波振幅的变化就小，传送信息的能力也低。如果调制指数大，则接收端的 S/N 比（信噪比）就良好。但是，当 m 比 1 大为过调制时，接收端的信号会发生畸变，占有频带宽，会遭受其他播放的载波干扰。

调幅指数

集电极调制电路

图 4.63 表示一种**集电极调制电路**。给晶体管以深度偏置，将载波信号施加到基极上，使集电极电流达到饱和状态。调制信号通过变压器串联加到集电极上，则集电极电压变化形成已调波。

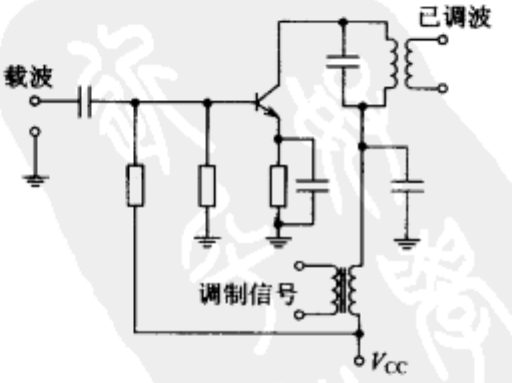


图 4.63　集电极调制电路

AM 调制波的检波

检波电路

从接收到的电波中取出声音等信息的电路为**检波电路**。图 4.64 表示检波电路的基本构造。已调波输入到二极管进

行整流。图 4.65 表示整流波形，可以看出图 4.62 中所示的已调波被半波整流，去掉了负的部分。整流后的波形，再由低通滤波器(LPF Low Pass Filter)滤除载波的高频成分，就可以获得相当于图 4.61 上侧所示包络线的检波信号。

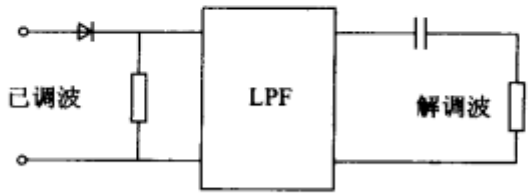


图 4.64 检波电路

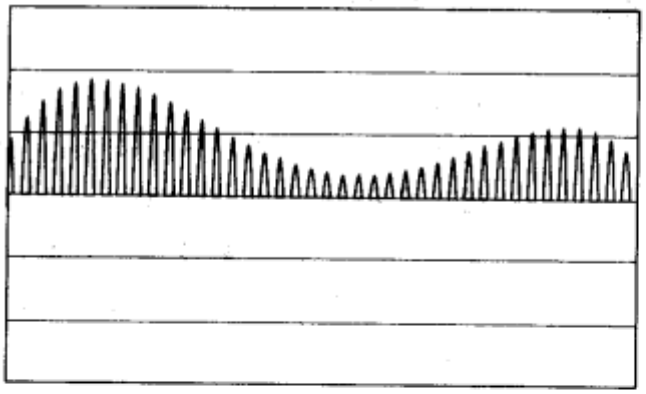


图 4.65 整流波形

13　调频电路

要点

频率调制(FM:Frequency Modulation,简称调频),是在FM无线电播送中使用的调制方式,其载波的频率随调制信号振幅的变化而变化。由于一般采用比调幅时所用的更高频的载波,故可传送很多信息,与AM无线电播送相比,FM传送的音质更好。

解释

调频的方式

调频

图4.66表示希望送出信息的调制信号 $g_s(t)$(上侧)与载波 $g_c(t)=A\sin(2\pi f_c t+\theta)$(下侧)。横轴为时间轴,纵轴分别为它们的振幅。举例来说,$g_s(t)$如表示FM无线电传送的声音信号,载波的频率 f_c 在NHK(日本广播公司)的FM中为82.5MHz。调频前的载波频率 f_c 是一定的,如图4.66所示。这里以下式给出调频后已调波的瞬时频率 f_i,它与调制信号成正比:

$$f_i=f_c+kg_s(t)$$

由于已调波的相位是将瞬时频率 f_i 进行时间积分而给出,故已调波由下式确定:

$$g_{FM}(t)=A\sin\left[2\pi f_c t+\theta+2\pi k\int g_s(t)\,dt\right]$$

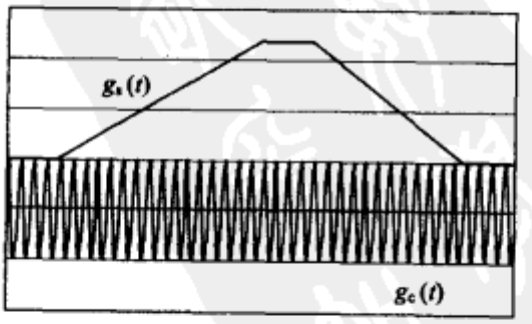


图4.66　调频用的调制信号与载波

图4.67表示按照图4.66上侧的调制信号进行调制后的已调波。由 $g_s(t)$ 的形状决定,在原来的频率之后频率持续上升为高频,然后再减小,成为与原来相同的低频。如该

图所示，载波的振幅虽为一定，但频率的大小却随调制信号的变化而变化。

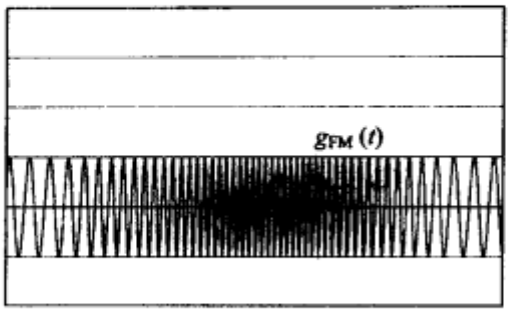


图 4.67　按图 4.66 调频后的已调波

最大频率偏移

在调制信号的振幅最大时，频率偏离 f_c 的变化，称为**最大频率偏移**，以 Δf 表示。令此时调制信号的频率为 f_s，则 $m_f=\Delta f/f_s$ 称为**调频指数**，是表示调频的程度的量。此外，调频所占有的频带宽度为

调频指数

$$B_f=2(\Delta f+f_s)$$

B_f 相当于由调制信号决定的已调波频率围绕 f_c 能有多大程度的变化幅度，因为一般比调幅的带域宽度要广阔，故在调频中应当有超短波带以上的载波。

变容二极管
调频电路
可变电容器

图 4.68 是利用**变容二极管的调频电路**。令施加到二极管上的反偏压发生变化，就相当于等效电容发生了变化，利用它可作为**可变电容器**使用。用此可变电容器组成振荡电路，就可进行调频。

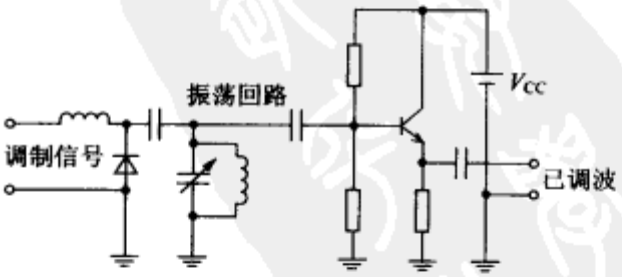


图 4.68　利用变容二极管的调频电路

FM 调制波的解调

解调

从 FM 调制的载波中取出声音等信息称为**解调**。与前节所述从 AM 调制的载波中取出信息一般称为检波不同，

FM调制波的解调，一般要利用谐振电路的谐振特性，即利用频率一旦离开谐振频率输出就有变化这一特点。

相位调制

调相

相位调制（简称**调相**）是被调相了的已调波的相位与调制信号成正比而变化的调制方式，它和调频合起来被称为

角度调制

角度调制。这时的已调波由下式确定：

$$g_{PM}(t)=A\sin[2\pi f_c t+\theta+2\pi k_p g_s(t)]$$

研究课题

所谓调制，就是把信息附加到载波上，如上所述，根据载波的频率大小与调制方式，所附加的信息量有上限。如果将超过此上限的信息传送出去，在接收侧就会解调出与送信来源不同的信息。因此，通常要在送信侧限制发送的信息量，以调制载波、传送电波。表示信息量的一个标准是调制信号的频率。从把声音信号作为调制信号传送的场合可知，由普通吉他发出的声音，可有从155Hz的低音“咪”到1242Hz的高音“咪”3个八度音，如果能够以最大为1300Hz的频率来调制载波，则在接收侧解调出吉他的声音就是悦耳的。由此可知，每种通信媒体有其可送信号的最大频率，典型的例子如下：

固定电话：3.4kHz

无线电的AM播送：7kHz

无线电的FM播送：～20kHz

地上波电视（NTSC方式）：6MHz

高清晰电视：27MHz

如以上所示，若希望送出的信息量大，则通信媒体的最大频率就必须与其成正比而增大。但是，传送的信息不光有音响信号（声音或音乐），还有图像（静止图像或动态图像），因此在这个迎接通信与播放相结合时代，作为传送含文字信息数据的手段，调制技术越来越重要。

14　直流稳压电源电路

要　点

由供给一般家庭的100V交流电压来产生直流电压，以驱动各种电子机器，要利用直流稳压电源电路。

解　释

直流稳压电源电路的构成

变压电路
整流电路
滤波电路
稳压电路

图4.69表示直流稳压电源电路的原理，主要由**变压电路**、**整流电路**、**滤波电路**及**稳压电路**构成。图4.70表示上述各电路的输入信号电压波形。下面说明有关各电路的作用。

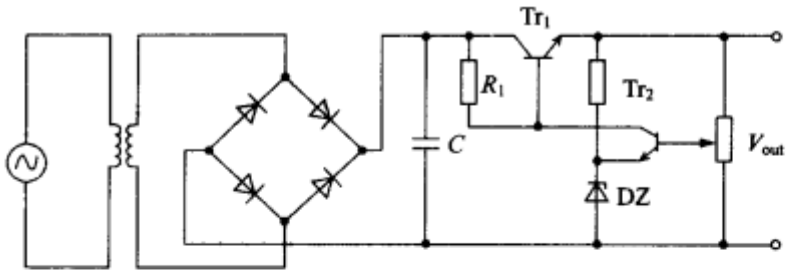


图4.69　直流稳压电源电路

变压电路，是直流稳压电源电路的输入部分，起到将图4.70(a)所示100V交流电源电压降低到合适的交流电压的作用。图4.70(b)表示降低后的交流电压，作为下一级整流电路的输入。变压电路通常要采用变压器，要在最后阶段输出必需的功率。

整流电路，具有将由变压电路降压后的交流电压的变化方向变成一个方向的作用，图4.69表示采用二极管桥式电路的**全波整流电路**。图4.70(c)表示整流后的电压波形，它是将图4.70(b)所示电压波形中负的部分变成正的再叠加上去的波形。整流后的电压，就其波形而言称为脉动电压，要供给滤波电路作为输入。整流电路还有采用整流二极管的**半波整流电路**，在这种场合是将负的电压部分去掉，因而使整流效率恶化，脉动较多，因此不推荐使用。

全波整流电路

半波整流电路

滤波电路，其作用是将由整流电路得到的脉动电路平滑成接近直流电压，可利用电容器的充、放电的作用。当输入

到滤波电路的脉动电压上升时，在滤波用电容器 C 的两端储存电荷。达到脉动的最大电压后，当输入电压开始下降时，从电容器向负载缓慢放电流出电流，到下一个周期再开始充电，如此反复，从而形成如图 4.70(d)所示的锯齿形波形。这种锯齿波形的电压也是脉动电压，取决于负载消耗的功率和滤波电容器的大小，脉动电压的峰间电压会有变化。

滤波电容器
脉动电压

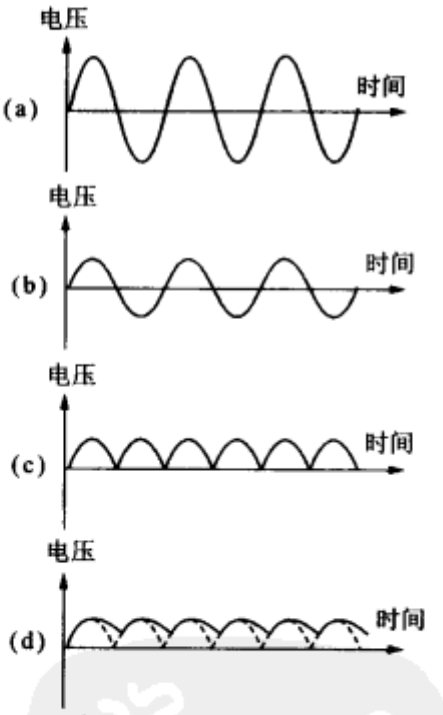


图 4.70　输入信号

稳压电路，是面对电源电压的变动或负载的变化，能够将最后阶段的直流电压保持一定作为输出的电路。如果由于某种原因使输出电压 V_{out} 变大了，则晶体管 Tr_2 的基极电压也随之上升，但因齐纳二极管 DZ 的基准电压一定，故晶体管 Tr_2 的基极-发射极间电压也随之升高。于是，晶体管 Tr_2 的集电极电流增大，通过在 R_1 上的压降，使晶体管 Tr_1 的基极电压降低。其结果是造成晶体管 Tr_1 的基极-发射极间电压减小，使晶体管 Tr_1 的集电极电流减小，输出电压下降，起到力求回复原来的电压这种反馈作用。在输出电压 V_{out} 变小的场合，发生与上述相反的反馈作用，使电压

增大，输出电压稳定。

三端电压调整器

稳压电路的集成化产品有三端电压调整器，是非常简便的稳压电源。其中 78LXX、78XX 型为输出正电压的三端电压调整器，最大输出电流分别是 100mA、1A。文字“XX”表示输出电压，可在 5、6、8、12、15、18、24V 之中选择。79LXX、79XX 型是输出负电压的三端电压调整器，其输出电压是固定的。与此相对应，市场上还出售外带电阻器，这是可使输出电压可变的 IC 产品。

15　开关电源电路

要　点

开关电源电路作为小型、轻便和高效的电源，在各种电子仪器中配套使用，与直流稳压电源相比，具有产生脉冲性干扰的缺点。

解　释

上节所述的直流稳压电源，由于通常在进行稳压的控制元件中流有电流，从而使发热等功率损耗大，电源效率较差。本节所介绍的开关电源电路，由于是利用半导体开关的开闭进行电力控制，故不但能实现低损耗的电源，并且与直流稳压电源相比，还可大幅度实现小型、轻量化。

开关控制

开关控制

图 4.71 与图 4.72 表示作为开关电源电路工作原理的有关**开关控制**的原理，其中图 4.71 表示可用电子的开、关(on、off)来控制直流电源电压对负载的供给。这里的开关，通常是采用半导体开关。今设开关的接通与断开时间之比为 2∶1，实行这样的开关控制，则**开关电源电路**的输出电压如图4.72(a)所示。这时的平均电压为图 4.72(a)中的虚线位置。

开关电源电路



图 4.71　开关控制

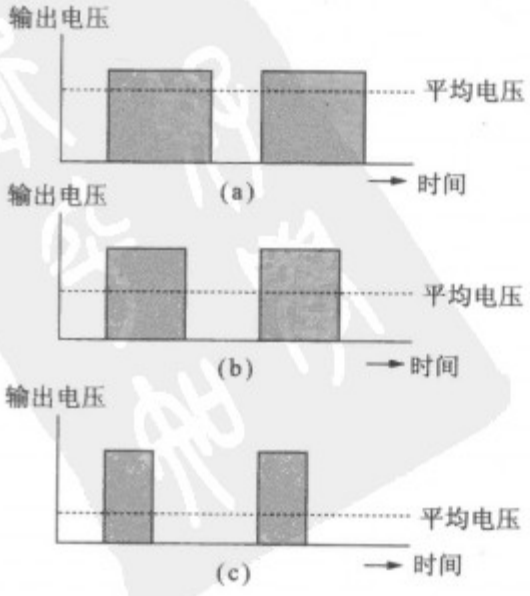


图 4.72　开关电路的输出电压

其次，若开关的接通与断开时间之比为 1 ∶ 1，如图 4.72(b)所示，其平均电压为图 4.72(b)中虚线位置，比图 4.72(a)的虚线位置要低。图 4.72(c)是开关的接通与断开时间之比为 1 ∶ 2 的情形，平均电压就更低了。由此可见，利用开关的通、断时间间隔的变化，就可以使输出电压有效地改变。这种由电子线路实施的开关控制就是开关电源电路。但是，半导体开关并不是理想的，伴随开关会有波动和干扰，因此应注意细心设计干扰滤波器或屏蔽结构。

电路的构成

图 4.73 表示开关电源电路的一个示例。图中，晶体管起开关的作用，而此晶体管的接通与断开则由运算放大器进行控制。运算放大器的反相输入端与输出电压 V_{out} 相接，其同相输入端则在所接的齐纳二极管 DZ 的基准电压之上又重叠了锯齿波状电压。运算放大器的输出，与同相输入电压-反相输入电压成正比，在同相输入电压比反相输入电压大时输出正的电压，使晶体管的集电极-基极之间电压降低，晶体管处于断开状态。这时，开关为打开状态，电路的输出为 0V。

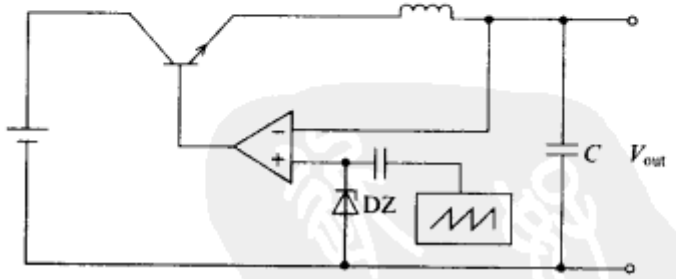


图 4.73 开关电源电路

反之，若同相输入比反相输入电压小时，开关处于闭合状态，由电路输出一定的电压。因此，随着同相输入电压与反相输入电压相等的“锯齿波”限制电平，晶体管的接通与断开可在“锯齿波”的周期中来分配，实现对晶体管的开关控制。此外，若输出电压 V_{out} 增大则限制电平升高，对于被设计成晶体管的接通时间间隔短的电路，会使由开关电源电路输出的平均电压下降，相对于输出电压的变化应确保有稳定的输出。

16　数的表示

要　点

在数字电路中使用“0”与“1”两个数值的逻辑，将电气信号的大小用二进制数来表示。将二进制数的1位称为1比特，n位的二进制数为n比特。用二进制数n比特可以表示由0～2^{n-1}的十进制数，还有使用将多位的二进制数用十六进制数来表示的方法。在二进制数中，将负数用补码来表示，因此可将减法运算用比特的加法运算进行。

解　释

二进制数

二进制数(binary number)的最小单位称为比特(bit)，比特数就是位数。用1比特1位可表示十进制数的0与1，2比特2位可表示十进制数的0、1、2、3。

由4比特二进制数所表示的由0～15的十进制数示于表4.4中，而小数点以下的情况则示于表4.5中。

二进制数与十进制数N之间的关系如式(4.28)所示，即

$$N=a_n\cdot 2^n+a_{n-1}\cdot 2^{n-1}+\cdots+a_2\cdot 2^2+a_1\cdot 2^1+a_0\cdot 2^0 \tag{4.28}$$

式中，a为各比特的系数，其值为0或是1。

表4.4　4比特二进制数与十进制数

用4比特表示的二进制数				十进制数
$2^3=8$	$2^2=4$	$2^1=2$	$2^0=1$	
0	0	0	0	0+0+0+0=0
0	0	0	1	0+0+0+1=1
0	0	1	0	0+0+2+0=2
0	0	1	1	0+0+2+1=3
0	1	0	1	0+4+0+1=5
0	1	1	0	0+4+2+0=6
1	1	1	0	8+4+2+0=14
1	1	1	1	8+4+2+1=15

表 4.5 小数点以下的 4 比特二进制数与十进制数

用 4 比特表示的小数点以下二进制数				十进制数
2^{-1}	2^{-2}	2^{-3}	2^{-4}	
=0.5	=0.25	=0.125	=0.0625	
0	0	0	1	0.0625
0	0	1	0	0.125
0	1	0	1	0.3125
1	1	1	1	0.9375

二进制数
十进制数

小数点以下 n 位的**二进制数**与**十进制数**的关系如下式所示：

$$\begin{aligned} & b_1 \cdot 2^{-1} + b_2 \cdot 2^{-2} + b_3 \cdot 2^{-3} \\ & \quad + b_4 \cdot 2^{-4} + \cdots + b_n \cdot 2^{-n} \\ & = b_1 \cdot 0.5 + b_2 \cdot 0.25 + b_3 \cdot 0.125 \\ & \quad + b_4 \cdot 0.0625 + \cdots + b_n \cdot (1/2^n) \end{aligned} \tag{4.29}$$

式中，b 为小数点以下各比特的系数，其值为 0 或 1。

十六进制数

在用 4 比特表示的十进制数 10～15 当中，10～15 是用 A～F 表示的。在使用 8 比特二进制数的时候，若是下位 4 比特与上位 4 比特分别用十六进制数来表示，可以用 00～FF 来表示。在使用 16 比特的时候，则可以用 0000～FFFF 来表示。表 4.6 表示 4 比特与 8 比特二进制数向**十六进制数**的变换。

十六进制数

表 4.6 十六进制数的表示

十进制数	4 比特	十六进制数	8 比特	十六进制数	十进制数
0	0000	0	00000000	00	0
1	0001	1	00000001	01	1
2	0010	2	00000010	02	2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
9	1001	9	00001110	0E	14
10	1010	A	00001111	0F	15
11	1011	B	00010000	10	16
12	1100	C	00010001	11	17
13	1101	D			
14	1110	E	10110110	B6	182
15	1111	F			
			11111110	FE	254
			11111111	FF	255

BCD 码:十进制符号的二进制化

BCD(binary coded decimal)码是将十进制的各位数用 4 比特二进制数来表示。十进制数与 BCD 码的关系见表 4.7。

表 4.7　十进制数与 BCD 码的关系

十进制数		BCD
0		0000
1		0001
2		0010
9		1001
10	0001	0000
11	0001	0001
21	0010	0001
35	0011	0101
99	1001	1001

由 16 比特 BCD 码向十进制数变换

位	10^3	10^2	10^1	10^0
	0010	1000	0101	0111
	3	8	5	7

$=3857$

负数的表示

补码

二进制的**补码**表示法有“1 的补码”与“2 的补码”两种。“1 的补码”是与二进制数的比特相反的数码,“2 的补码”则是在“1 的补码”上加 1 后的得数。负数的表示见表 4.8。

表 4.8　负数的表示

十进制数	8 比特表示	1 的补码	2 的补码
127	01111111	1000000	10000001
126	01111110	1000001	10000010
125	01111101	1000010	10000011
⋮	⋮	⋮	⋮
3	00000011	11111100	11111101
2	00000010	11111101	11111110
1	00000001	11111110	11111111
0	00000000	11111111	无

采用“2 的补码”表示负数,可将减法运算用比特的加法运算进行。表示负数的二进制数最上位(MSD)的比特为 1。

在进行 3−1=2 的计算时,在 3 的二进制数表示中加上 1 的“2 的补码”:

00000011 + 11111111 = 00000010（忽略 MSD 往上的位）

例 题

[1] 把 1001.0110 变换成十进制数。

答　1001 可变为 $2^3+2^0=8+1=9$，小数点以下的.0110 可变为

$2^{-2}+2^{-3}=0.25+0.125=0.375$

因此有

$9+0.375=9.375$

17　逻辑代数(布尔代数)

要　点

在逻辑电路中，人们将电压信号用“0”与“1”两个数值进行处理并运算，数学中“0”与“1”的逻辑运算的体系即逻辑代数，称之为布尔代数。布尔代数由若干定理构成，是数字电路的理论基础。采用算子(·)表示逻辑积，(即“与”)，(+)表示逻辑和(即“或”)，(−)表示逻辑非(即“非”)。

解　释

布尔代数的主要定理

	$A+0=A$	$A\cdot 0=0$	
	$A+1=1$	$A\cdot 1=A$	
重叠律	$A+A=A$	$A\cdot A=A$	重叠律
互补律	$A+\bar{A}=1$	$A\cdot\bar{A}=0$	互补律
还原律		$A=\bar{\bar{A}}$	还原律
交换律	$A+B=B+A$	$A\cdot B=B\cdot A$	交换律
结合律	$A+(B+C)=(A+B)+C$	$A\cdot(B\cdot C)=(A\cdot B)\cdot C$	结合律
分配律	$A\cdot(B+C)=(A\cdot B)+(A\cdot C)$	$A\cdot(B\cdot C)=(A+B)\cdot(A+C)$	分配律
吸收律	$A+(A\cdot B)=A$	$A\cdot(A+B)=A$	吸收律
	$A+(\bar{A}\cdot B)=A+B$	$A\cdot(\bar{A}+B)=A\cdot B$	
德·摩根定理	$\overline{A+B}=\bar{A}\cdot\bar{B}$	$\overline{(A\cdot B)}=\bar{A}+\bar{B}$	德·摩根定理

逻辑变量 A、B 与 C 可为“0”或是“1”。因此，$A=1$ 时 $\bar{A}=0$，$A=0$ 时 $\bar{A}=1$。对于 B 与 C 也同样。也有省用逻辑“与”的算子(·)的。在数字电路中，逻辑“与”采用 **AND 电路**，逻辑“或”采用 **OR 电路**，逻辑“非”采用 **NOT 电路**。

AND 电路
OR 电路
NOT 电路

例　题

1 利用布尔代数的公式，简化 $X=(A+B)(B+C)(C+A)$。

答　$X=(B+A)(B+C)(C+A)=(B+AC)(C+A)$　交换律、分配律

$=(B+AC)C+(B+AC)A=BC+CCA+AB+CAA$

分配律、交换律

$=AB+BC+CA$　重叠律、交换律

18　逻辑电路的基本原理

要　点

逻辑“与”(·)“或”(+)、“非”(−)的逻辑运算可用AND电路、OR电路与NOT电路构成的逻辑电路来实现。由这三种基本电路进行组合，可构成所有的逻辑电路。逻辑电路的工作可用逻辑符号表示，对复杂的逻辑电路也可使用布尔代数的定理将其简化。

解　释

基本逻辑电路与逻辑符号

逻辑电路的部分符号如图4.74所示。一般地，出于能对其功能一目了然之目的，使用已广为普及的MIL(美国军用)符号。

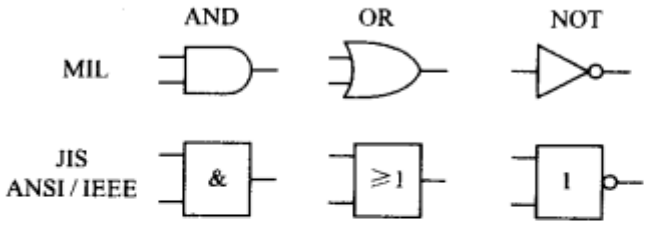


图4.74　逻辑符号

在数字电路中，电气信号的有无用电压的高低来判别。

通常将信号的“有”与电压的高即“H”相对应，信号的“无”与电压的低即“L”相对应。这称为正逻辑，若将“H”换成“1”、“L”换成“0”更易理解。

AND电路如图4.75所示。在AND电路中，有两个以上输入和一个输出，只有所有的输入均为“H”时，输出才为



符号

$X = A \cdot B$

逻辑式

输入		输出
A	B	X
L	L	L
L	H	L
H	L	L
H	H	H

真值表

图4.75　AND电路

“H”。除此以外在所有情况下，输出均为“L”。

OR 电路如图 4.76 所示。在 OR 电路中，有两个以上输入和一个输出，当至少有一个输入为“H”时，输出为“H”。除此以外的情况下，输出为“L”。



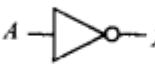
$X = A + B$

输入		输出
A	B	X
L	L	L
L	H	H
H	L	H
H	H	H

符号　　逻辑式　　真值表

图 4.76　OR 电路

NOT 电路如图 4.77 所示。在 NOT 电路中，有一个输入和一个输出，输出与输入相反。



$X = \overline{A}$

输入	输出
A	X
L	H
H	L

符号　　逻辑式　　真值表

图 4.77　NOT 电路

NAND 电路与 NOR 电路

NAND(与非)电路

NOR(或非)电路

NAND(与非)电路是在 AND 电路之后又接以 NOT 电路的电路，**NOR(或非)电路**是在 OR 电路之后再接以 NOT 电路的电路。这种电路是与上述基本电路同样重要的电路，在数字电路中要经常使用。图 4.78 表示 NAND 电路，



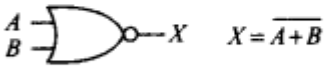
$X = \overline{A \cdot B}$

输入		输出
A	B	X
L	L	H
L	H	H
H	L	H
H	H	L

符号　　逻辑式　　真值表

图 4.78　NAND 电路

图 4.79 表示 NOR 电路。



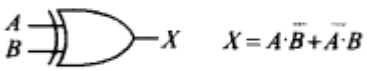
输入		输出
A	*B*	*X*
L	L	H
L	H	L
H	L	L
H	H	L

符号　　逻辑式　　真值表

图 4.79　NOR 电路

ExOR 电路与 ExNOR 电路

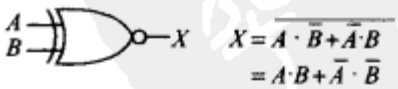
ExOR 电路是异或电路。ExNOR 电路是在 ExOR 电路上又连接了 NOT 电路的电路，通常在一致性检测电路等场合下使用。ExOR 电路示于图 4.80，ExNOR 电路示于图 4.81。



输入		输出
A	*B*	*X*
L	L	L
L	H	H
H	L	H
H	H	L

符号　　逻辑式　　真值表

图 4.80　ExOR 电路



输入		输出
A	*B*	*X*
L	L	H
L	H	L
H	L	L
H	H	H

符号　　逻辑式　　真值表

图 4.81　ExNOR 电路

负逻辑

负逻辑
正逻辑

负逻辑与**正逻辑**相反，即“H”与信号“无”的“0”、“L”与信号“有”的“1”相对应。将此称为L有效，图形符号中的

输入与输出要用小白圈(称为状态表示符号)来表示。

AND 电路若采用正逻辑输入的 AND 就以正逻辑输出。与此相对应,NAND 电路若采用正逻辑输入的 AND 则以负逻辑输出。同理,OR 电路若采用正逻辑输入的 OR 就以正逻辑输出,NOR 电路若采用正逻辑输入的 OR 则以负逻辑输出。NOT 电路是将正逻辑的输入变换成负逻辑的输出。图 4.82 是正逻辑与负逻辑的逻辑表示符号。

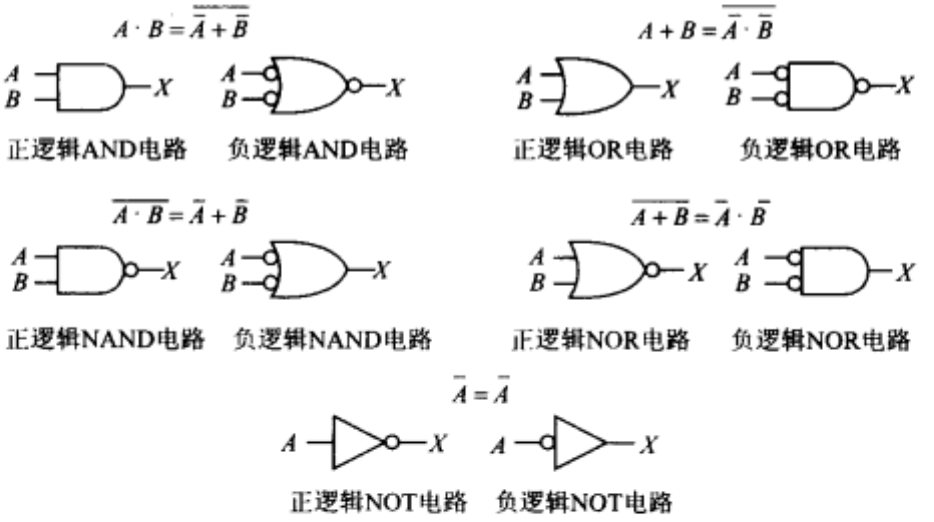


图 4.82　正逻辑与负逻辑

相关知识

◆ 加法运算电路

内部不含记忆元件,仅由输入条件决定输出的电路称为组合逻辑电路。在组合逻辑电路中,有以二进制数的运算电路为基础的半加法运算器与全加法运算器。前者又称半加器,后者又称全加器。图 4.83 表示半加器与全加器的逻辑结构。

半加器是没有从下位往上位进位信号的加法运算器,部分和 S 与进位 C 由下式表示:

$$S = A \cdot \bar{B} + \bar{A} \cdot B$$

$$C = A \cdot B$$

如进行两次半加法运算,就可构成具有由下位进位信号(C_{IN})的全加器,全

和 S_{OUT} 与进位 C_{OUT} 如下式所示：

$$S_{OUT}=A\cdot B\cdot C_{IN}+\bar{A}\cdot\bar{B}\cdot C_{IN}+\bar{A}\cdot B\cdot\bar{C}_{IN}+A\cdot\bar{B}\cdot\bar{C}_{IN}$$

$$C_{OUT}=A\cdot B+B\cdot C_{IN}+C_{IN}\cdot A$$

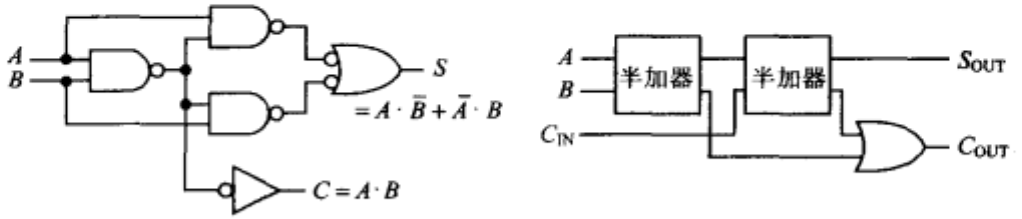
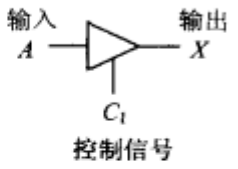


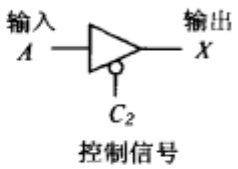
图 4.83　半加器与全加器

◆ 三态缓冲电路

有一种不论是“H”还是“L”输出均处在与电路脱离的状态(高阻抗)，由控制信号决定输入信号向输出的接通、断开的三态缓冲电路。其电路与工作如图 4.84 所示，可作为连接总线的门电路使用。



C_1	X
L	Z
H	A



C_2	X
L	A
H	Z

Z：高阻抗…与输出脱离接触状态等效

图 4.84　三态缓冲电路

选修知识

由逻辑式可构成逻辑电路。将布尔代数的结合律、分配律及其他定理的公式用逻辑电路来表示，如图 4.85 所示。

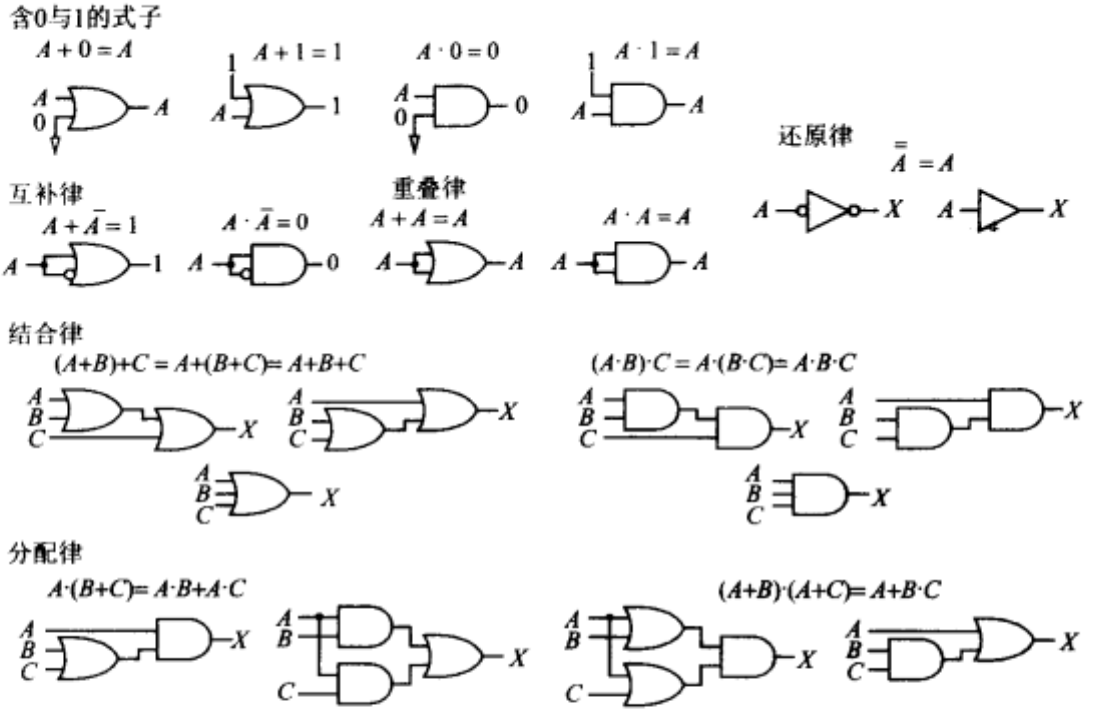


图 4.85　布尔代数与逻辑电路

例 题

[1] 用逻辑式和逻辑电路表示有 3 个输入的德・摩根定理。

答　把德・摩根定理的 2 个输入扩展为 3 个输入，使正逻辑 NAND 电路成为负逻辑 NAND 电路。同理，使正逻辑 NOR 电路成为负逻辑 NOR 电路。结果如图 4.86 所示。



图 4.86　3 个输入的德・摩根定理与逻辑电路

19　数字集成电路

要　点

当前在数字电路中多使用高集成化的逻辑 IC(集成电路)。标准逻辑 IC 的 74 系列，也正由历来所用 TTL 向 CMOS 转换。从基本的组合逻辑电路 IC 到含触发器等记忆元件的复杂时序电路 IC，有相当多的 IC。

解　释

TTL 与 CMOS

作为标准逻辑 IC 的 TTL(Transister Transistor Logic)，SN74 系列已被开发出来，其后又开发了 CMOS (complementary symmetry MOS)、4000/4500 系列、与 TTL 有互换性的 74HC/HCT 高速系列、74AC/ACT 系列。DIP 类型的标准逻辑 IC，7404(NOT 电路)与 7400(NAND 电路)的引脚安排如图 4.87 所示。由 TTL 与 CMOS 构成 NAND

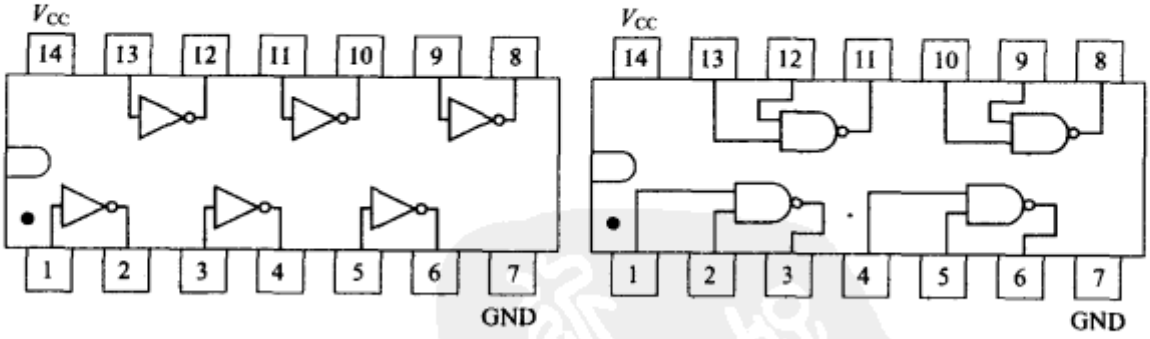


图 4.87　7404 与 7400 的引脚安排

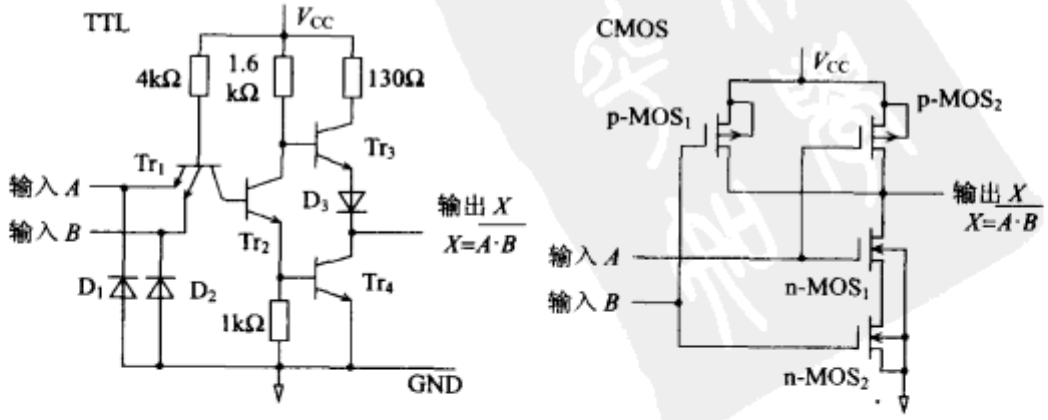


图 4.88　由 TTL 构成的 NAND 电路与由 CMOS 构成的 NAND 电路

电路的基本结构，示于图 4.88 所示的等效电路。

由于 CMOS 是由 p 型与 n 型的 MOS 组合，故其工作是在输入为“L”时 p-MOS“接通”，n-MOS“断开”。反之，在输入为“H”时 p-MOS“断开”，n-MOS“接通”。

在 TTL 与 CMOS 中，输入和输出的逻辑电平如图 4.89 所示，可以看出它们是不同的。

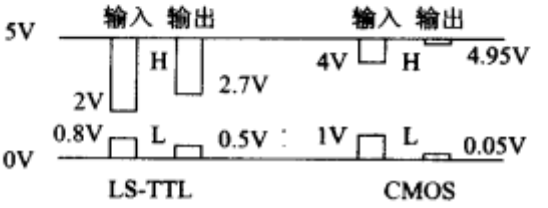


图 4.89　数字 IC 的逻辑电平

RS 触发器

RS 是最基本的触发器(RSFF：Reset Set Flip-Flop)，图 4.90 表示由 NOR 电路构成的 RS 触发器与工作情况。当 S(Set)输入为“L”→“H”→“L”时，输出 Q 置位变成“L”→“H”。在输出 Q 为“H”的状态，若 R(reset)端为“L”→“H”→“L”，则输出 Q 复位成“H”→“L”。图 4.91 表示由 NAND 电路构成的 L 有效的 **RS 触发器**。

RS 触发器

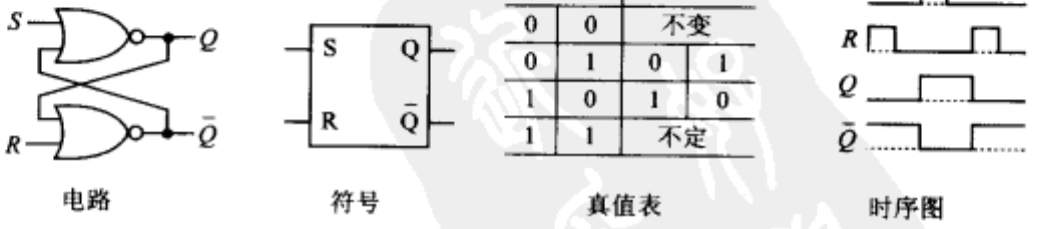


图 4.90　由 NOR 电路构成的 RS-FF

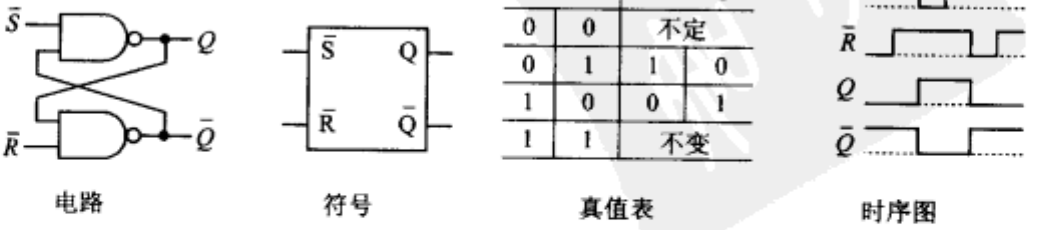
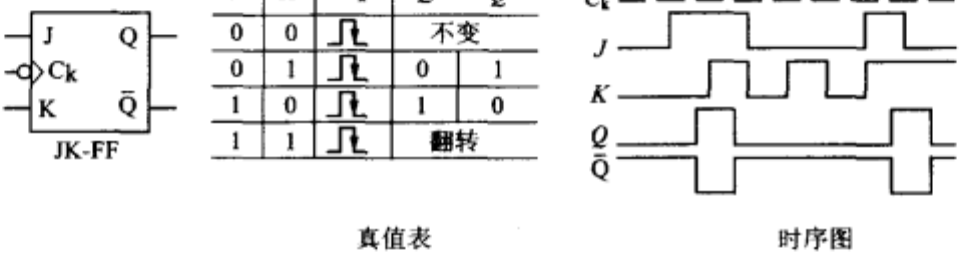


图 4.91　由 NAND 电路构成的 L 有效 RS-FF

JK 触发器

JK 触发器

在时钟脉冲的有效沿到达时，仅在 J 端输入为“L”→“H”时，输出 Q 置位为“L”→“H”。当 J 端与 K 端同时有输入时，输出 Q 翻转。完成同步式 RS 触发器的工作。图 4.92 表示时钟脉冲为“H”→“L”时在有效沿作用下 **JK 触发器**(JK-FF)的工作情况。



真值表　　时序图

图 4.92　JK 触发器

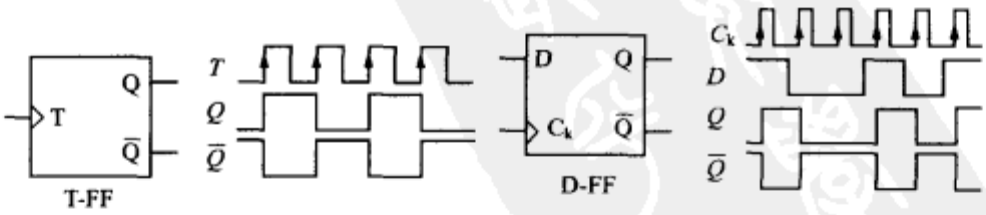
T 触发器与 D 触发器

T-FF

T-FF(Toggle Flip-Flop)是每当有时钟脉冲加到触发器的输入时，输出 Q 就按“H”→“L”→“H”→“L”变化。若令 JK-FF 的 J 与 K 端同时为“H”，就成为 T-FF。

D-FF

D-FF(delay flip-flop)具有数据和时钟两个输入，在时钟输入的有效沿时，采用输入的数据值作为状态，到下一个有效的时钟脉冲沿到来之前保持住此状态。图 4.93 表示 T-FF 与 D-FF 的工作情况。



时序图　　时序图

图 4.93　T-FF 与 D-FF

十六进制计数器与十进制计数器

十六进制计数器

用 T-FF 可构成 2^n 进制计数器。图 4.94 表示由 JK-FF制作的由 T-FF 构成的**十六进制计数器**示例。为了

把二进制数用十进制数来表示，还需要十进制计数器。为了把十六进制计数器的计数值在“1010”时归为“0000”，要采用 Q_B 与 Q_D 为 AND 的输入，其输出到各 FF 的 CLK(清零)端，就构成**十进制计数器**。图 4.95 表示十进制计数器。

十进制计数器

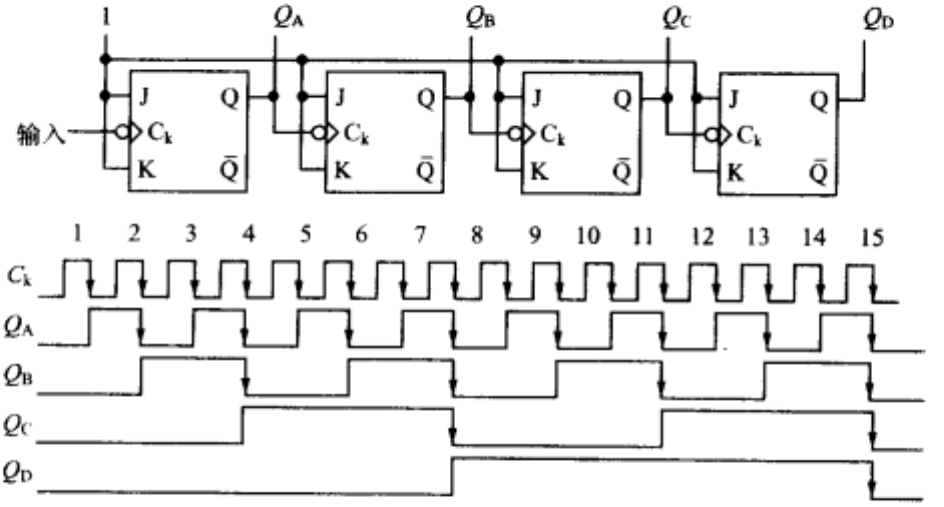


图 4.94　十六进制计数器

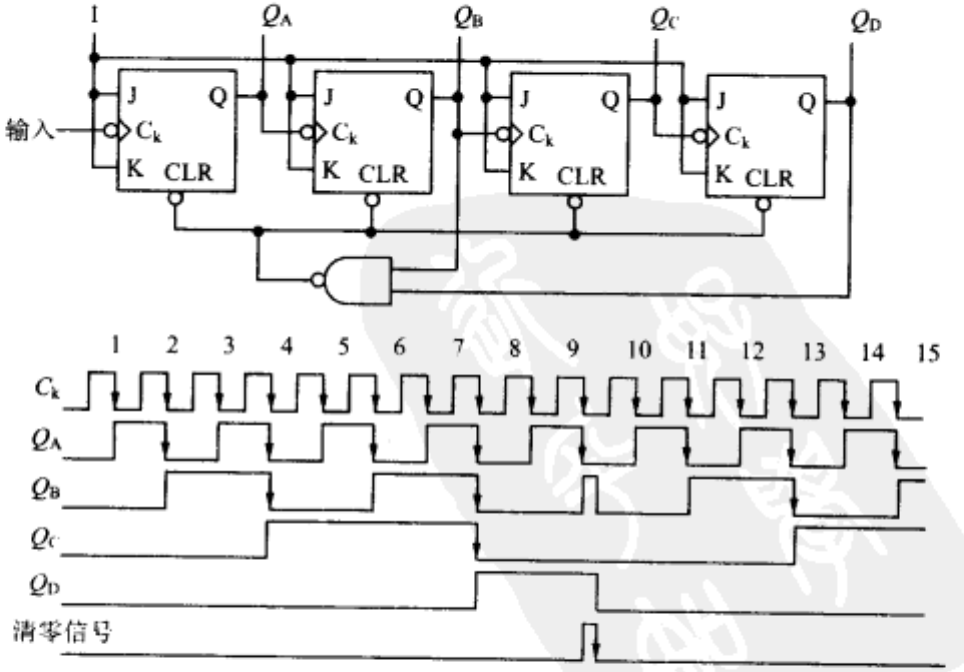


图 4.95　十进制计数器

在触发器中，由输入信号引起的向输出的变化会产生很小的时间延迟。因此，像计数器这样有多段触发器连接时，

异步计数器
同步计数器

在最后段的输出就有相当长的时间延迟产生。这种计数器称为**异步计数器**。为了避免信号传递的延迟，可使用**同步计数器**。图 4.96 表示四进制异步计数器和四进制同步计数器。在异步计数器中虽然 Q_A 与 Q_B 的变化产生时间差，但在同步计数器中 Q_A 与 Q_B 的变化不产生延迟。

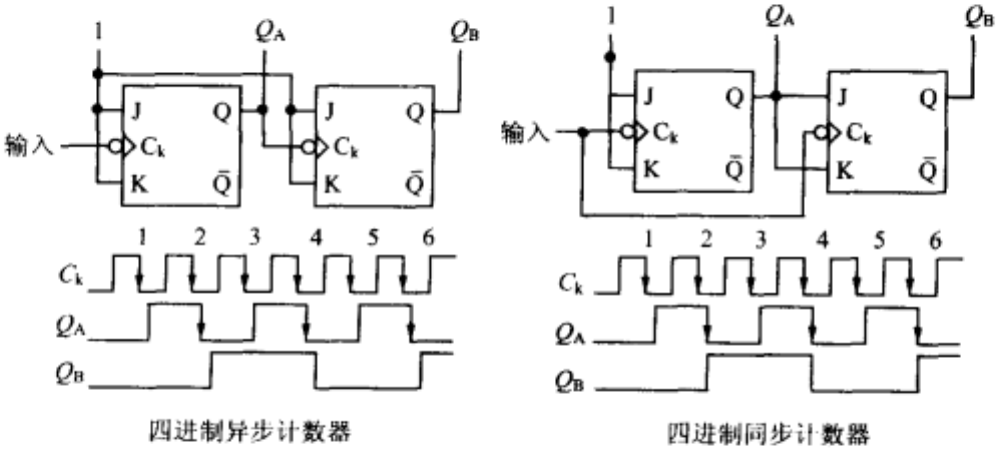


图 4.96　异步计数器与同步计数器

移位寄存器与环形计数器

移位寄存器

使用**移位寄存器**时，每当有移位脉冲输入时，其数据的内容移动 1 位。根据移位方向，有右移位型、左移位型、左右移位型。数据的输出方式有并行型与串行型。图 4.97 中所示系按 1、0、1、1 的顺序输入数据，却由移位脉冲决定向 Q_A、Q_B、Q_C、Q_D 的顺序移位。

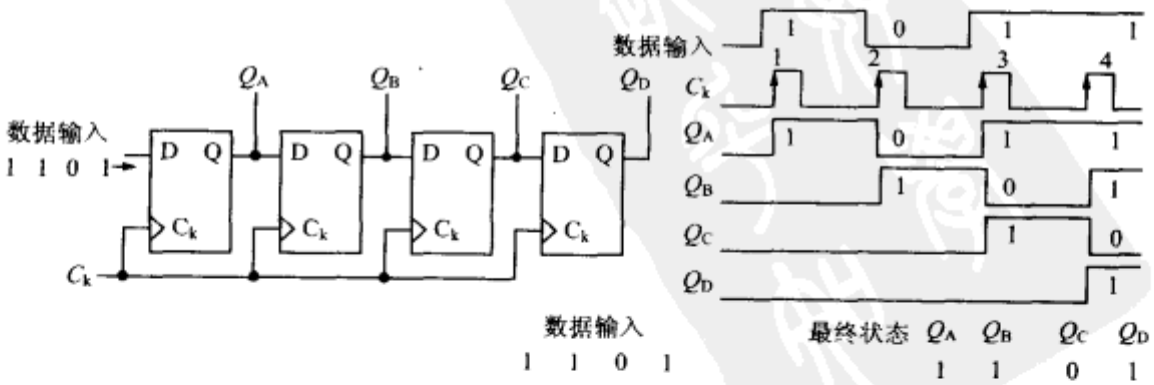


图 4.97　移位寄存器

环形计数器

环形计数器是把移位寄存器的最后段的输出与最初段

时钟脉冲　　相连接构成闭环的电路，如图 4.98 所示。它是与**时钟脉冲**同步，脉冲输出逐次向旁边移动的计数器。

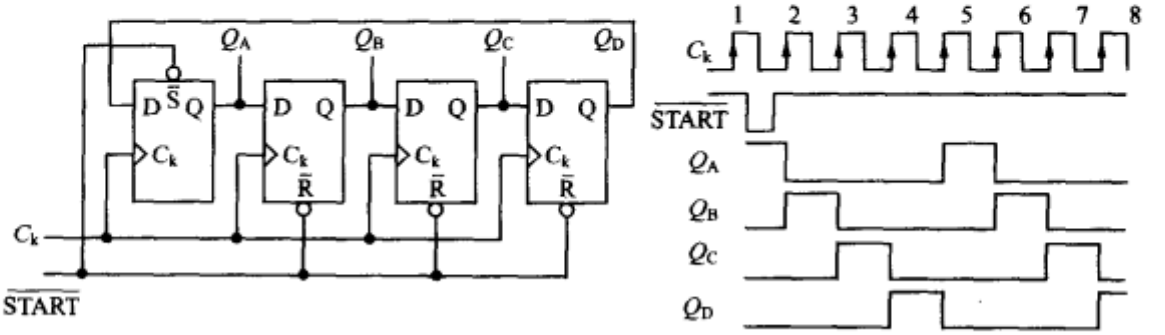


图 4.98　环形计数器

选修知识

在数字 IC 中，为避免误动作，要将不用的输入、输出引线（管脚），符合逻辑地接到电源或 GND 上。在一个输出引线上所能连接的逻辑电路数目称为扇出系数。在 TTL 的情况下扇出系数为 10 左右，在 CMOS 的情况下扇出系数为 50 左右。

在集电极开路或漏极开路时，输出与工作电阻或负载相连接。

20 A/D、D/A 变换器

要 点

把模拟信号变换成数字信号的电路或装置称为 A/D 变换器，相反，把数字信号变换成模拟信号的电路或装置称为 D/A 变换器。A/D 变换器或 D/A 变换器现多用集成电路化产品。理解其基于工作原理与方式的特点，对于灵活适用是十分必要的。

解 释

快速型 A/D 变换器

A/D 变换
采样保持电路

快速型又称并联型，适用于高速、低精度场合。图 4.99 所示为快速型 A/D 变换器的示例。用电阻将基准电压进行 2^n 等分，再由 2^n 个比较器将模拟输入信号与基准电压进行比较。将有信号输出的比较器号码编码输出，进行 **A/D 变换**。由于变换速度快，虽不必有**采样保持电路**，但若比特数增大则需大量的比较器，因此难以实现高分辨率。

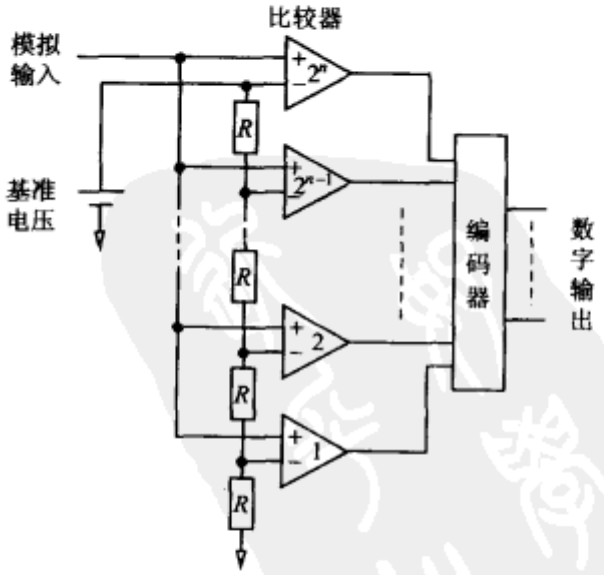


图 4.99 快速型 A/D 变换器

逐次比较型 A/D 变换器

由于在内部采用了数字处理电路，适用于中速、中精度的场合。图 4.100 所示为逐次比较型 A/D 变换器的示例。

它是采取将模拟输入信号与 D/A 变换器的输出进行比较的同时，由上位的位决定“0”、“1”的方式。逐次比较型 A/D 变换，在变换时需要时间，在变换期间，若输入变化在 1LSB 以上，则不能进行正确的变换，故需附带采样保持电路，以保持变换时的输入为一定。

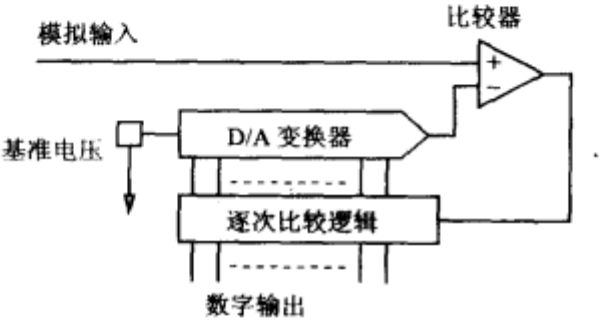


图 4.100　逐次比较型 A/D 变换器

积分型 A/D 变换器

积分型 A/D 变换器是适用于低速、高精度的 A/D 变换器，其构成示例见图 4.101。当 S_1 接通、S_2 断开时，积分器的电容充电，至与输入信号电压相等。然后，S_1 断开、S_2 接通，开始负基准电压的积分，电容器的电压开始按一定比率减小。同时，数字计数器开始计数，当电容器两端的电压为 0 时，比较器的输出变为 0，计数器停止计数。这时，计数器的计数值变成与输入信号电压成正比的数字输出。由于在积分期间对输入电压进行了平

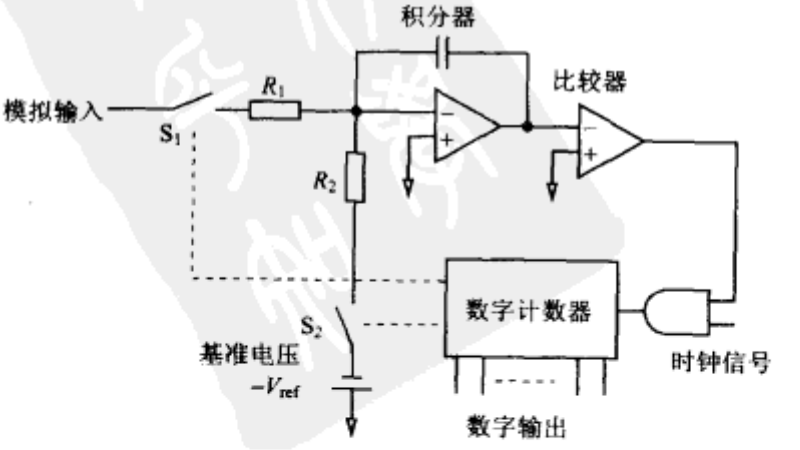


图 4.101　积分型 A/D 变换器

均化，故不需要采样保持电路。适合直流信号的 A/D 变换，易实现 IC 化。

Δ-Σ 转换型 A/D 变换器

因在内部电路中采用了数字信号处理，故基本上由积分电路(Σ)、取差的 Δ 部分、量化部分、延迟电路构成。由于精度高，适合音频等变化较平稳的信号的 A/D 变换使用。

权电阻型 D/A 变换器

图 4.102 表示电流相加运算的权电阻型 D/A 变换器。因运算放大器是反相放大的加法运算电路，故输出与各电阻的电流之和成正比的电压。在数字输入的各位的比特为“1”时接到基准电压 V_{ref} 侧，在带有各比特的权的电阻中流有电流。虽然在比特数小时制作较为简便，但在比特数增大时电阻值的范围急剧扩展，因此电阻值需有与分辨率相应的精度。

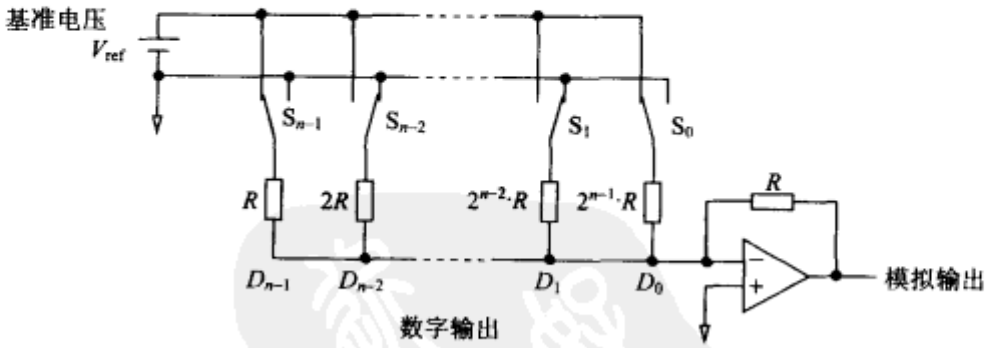


图 4.102 权电阻型 D/A 变换器

模拟输出电压 V_o，与各位的比特相应可用下式表示：

$$V_o = -RI = -R\left(\frac{V_{ref}}{R}D_{n-1} + \frac{V_{ref}}{2R}D_{n-2} + \cdots + \frac{V_{ref}}{2^{n-2}R}D_1 + \frac{V_{ref}}{2^{n-1}R}D_0\right)$$

$$= -\frac{V_{ref}}{2^{n-1}}(2^{n-1}D_{n-1} + 2^{n-2}D_{n-2} + \cdots + 2^1 D_1 + 2^0 D_0)$$

式中，系数 D 取“0”或“1”。开关 S 与数字输入相对应，使比特为“0”的位接到接地的 0 电位上，为“1”的位接到基准电压 V_{ref} 上。

在 4 比特数字输入时，模拟输出 V_o 由下式表示：

$$V_o = -R\left(\frac{V_{ref}}{R}D_3 + \frac{V_{ref}}{2R}D_2 + \frac{V_{ref}}{4R}D_1 + \frac{V_{ref}}{8R}D_0\right)$$

$$= -\frac{V_{ref}}{8}(8D_3 + 4D_2 + 2D_1 + 1D_0)$$

R-2R 梯形电阻型 D/A 变换器

与权电阻型 D/A 变换器同样，它是相应于比特的权进行电流的加法运算，从而获得输出电压的方式。图 4.103 表示 R-$2R$ 梯形电阻型 D/A 变换器。电阻网络仅由 R 与 $2R$ 两种电阻构成，因如梯子状故称梯形电阻型。由电阻的连接点看上去两个方向的电阻值均等于 $2R$，电流被 2 等分，在开关中流的电流为 1、1/2、1/4、1/8，与比特的权相对应。还有采用 R-$2R$ 梯形电阻网的电压相加运算型 D/A 变换器。

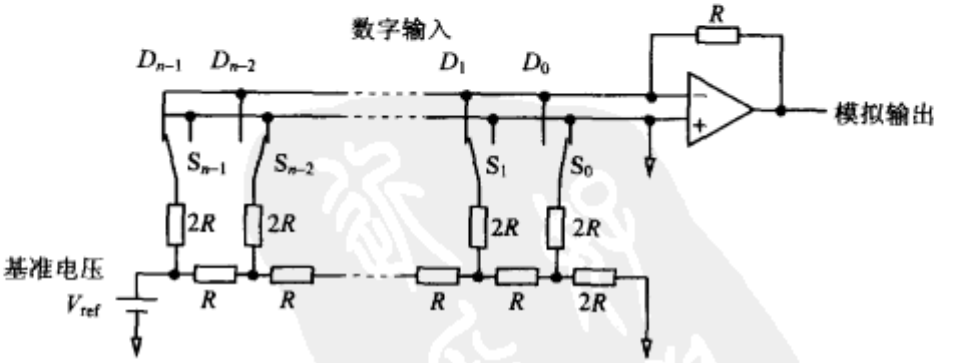


图 4.103　R-$2R$ 梯形电阻型 D/A 变换器

模拟输出电压 V_o 与各位的比特相对应由下式表示：

$$V_o = -RI$$

$$= -R\left(\frac{V_{ref}}{2^0}\cdot\frac{1}{2R}D_{n-1} + \frac{V_{ref}}{2^1}\cdot\frac{1}{2R}D_{n-2}\right.$$

$$\left. + \cdots + \frac{V_{ref}}{2^{n-2}}\cdot\frac{1}{2R}D_1 + \frac{V_{ref}}{2^{n-1}}\cdot\frac{1}{2R}D_0\right)$$

在4比特数字输入时，模拟输出V_o如下式所示：

$$V_o=-\frac{V_{ref}}{16}(8D_3+4D_2+2D_1+1D_0)$$

式中，系数D取“0”或“1”。开关S与数字输入相对应，为“0”的位接到0电位，为“1”的位接到基准电压U_{ref}上。

第5章

电工电子测量

● 责任编委
工藤雄司
● 执　　笔
扇柳政则(1～5)
坂じゅんいち(6～7)
前田平作(8～14)



为了掌握电路与电子电路的状态，有必要对有关电工与电子的各种物理量进行正确的测量，从而得知其准确的数值。因此，电工电子测量是电工电子技术的基础，没有电工电子测量，电工电子技术的发展是不可能的。

本章中将学习有关测量的方法，包括测量值的误差、指示仪表的分类与使用方法以及误差的适当处理方法。此外，还将学习关于数字式仪表、使用微机的电子测量系统等，以及电压、电流、电阻、功率、磁、频率、波形等测量的方法。

1　测量方法与测量值

要　点

所谓测量，就是求取像眼前的电阻器的电阻值或是其中所流过电流为基准单位的多少倍等所进行的操作。

而测量值，则是由一系列测量操作所获得的测得的量（值）。在测量值中包含有误差，误差的大小可用相对误差表示。

解　释

测　量

测量有直接测量和间接测量。直接测量就是在测量某一物理量时，将其与同类的量相比较而求得其值的方法。

例如，如图5.1所示，将万用表调至电阻测量挡，将测试棒接触电阻两端读取显示值，此即**直接测量**。

直接测量

间接测量

所谓**间接测量**，是测量与被测量有关的另外的量，然后通过计算求得结果的方法。例如，测量电阻数值，可采用图5.2所示的实验电路，测量电路中所流过的电流和电阻两端的电压。然后利用欧姆定律的公式求出电阻值，这就是间接测量。

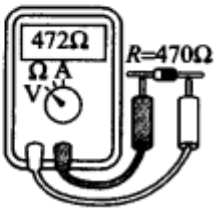


图5.1　直接测量

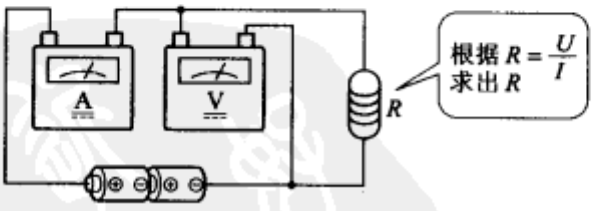


图5.2　间接测量

测量值

测量结果所得到的数值，应带有单位。表5.1中给出了若干**测量值**的单位符号。此外，测量结果中还包含了测量者的个性**误差**、测量仪器本身存在的误差以及目视误差等。

测量值

误差

表 5.1 被测量的单位符号

被测量	单位符号	被测量	单位符号
电压	V,mV,μV	电阻	Ω,kΩ,MΩ
电流	A,mA,μA	频率	Hz,kHz,MHz
功率	W,mW,kW	功率因数	$\cos\theta$

相关知识

◆ 偏位法与零位法

偏位法是根据测量仪表的刻度盘和指针的指示值来读取被测量的数值。测量较为简便，由指针的运动来判别被测量的大小较为容易，如果指针位置处在刻度与刻度之间，测量者可通过换算来读取数值。但是，用这种方法也会产生测量误差(见图 5.3(a))。

零位法是首先将被测量与标准量放在天平上进行比较，在达到平衡以前要仔细地增减标准量。到达平衡后，读取此标准量的数值作为被测量的大小。零位法虽然要花费一些时间，但其测量的精度较高(见图 5.3(b))。



(a) 偏位法　　(b) 零位法

图 5.3 偏位法与零位法

◆ 相对误差

设测量值为 M，真值为 T，则绝对误差为 $M-T$。由于绝对误差$(M-T)$是数值，故采用 $M-T$ 与 T 之比的百分数来表示误差，以便于与其他误差作比较。将此称为相对误差，用 $\varepsilon(\%)$表示：

$$\varepsilon=\frac{M-T}{T}\times 100\ (\%)$$

例 题

1 用电压表测量真值为 100V 的电压时得指示为 100.4V，试求此时的相对误差 ε。

答 0.4(%)

2　直流电压、电流的测量

要　点

为了测量直流电压或电流，可使用各种各样的测量仪表。这里介绍使用最多的动圈式（磁电式）测量仪表。

解　释

动圈式测量机构的工作原理

动圈式测量机构（见图 5.4）是由使指针运动的驱动装置、利用弹簧的控制装置、使指针运动静止下来的阻尼装置等构成。驱动装置由动圈和永久磁铁构成。当在线圈中有被测电流流动时，根据弗莱明左手定则，在电流产生的磁场与永久磁铁的磁力线作用下，产生电磁力。同时使指针偏转，指示的刻度即为测量值。

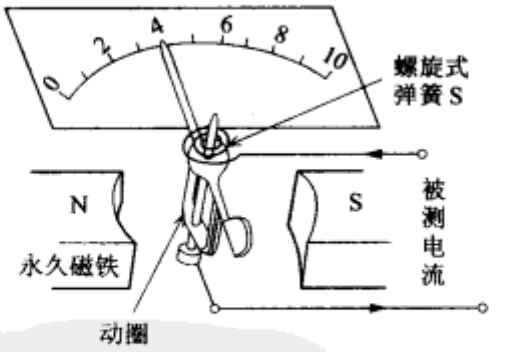


图 5.4　动圈式测量机构的构造

控制装置

控制装置是在动圈的上部与下部安设的**螺旋式弹簧** S。弹簧 S 的作用是，以其弹簧力与流有被测电流的导线的作用相抗衡，使动圈在与被测电流大小成正比的某一位置上停止运动。

阻尼装置

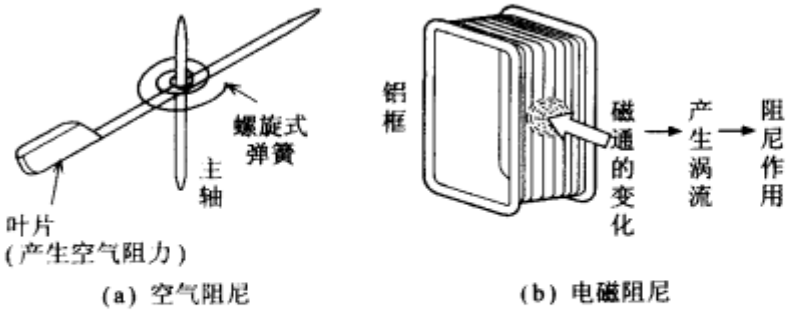
阻尼装置（见图 5.5）是使运动的指针能顺利地停止下来的机构，分为**空气阻尼方式**、**电磁阻尼方式**等。

空气阻尼方式

电磁阻尼方式

动圈式电流表

为使动圈式测量机构的线圈运动轻便，通常采用的是细导线，因此若直接用此测量机构来测量，能测的电流充其量不会超过几十毫安。因此，鉴于这种装置测量范围狭窄，可采



(a) 空气阻尼　　(b) 电磁阻尼

图 5.5　阻尼装置

用称为分流器的电阻 R_s 与此测量机构并联连接，让被测电流在动圈和 R_s 中分流，以提高电流表的实际测量范围。

例如，欲将内阻 $R_a=2\Omega$、最大可测 100mA 的电流表扩展为能测 1A 的电流表，可如图 5.6 所示让电流在原电流表中为 100mA，在分流电阻中为 900mA。因为这样一来，是将 100mA 的电流表变成 1000mA 的电流表，故倍率 $m=10$，可知分流器 R_s 为：

$$R_s=\frac{R_a}{m-1}=\frac{2}{10-1}=0.22\ (\Omega)$$

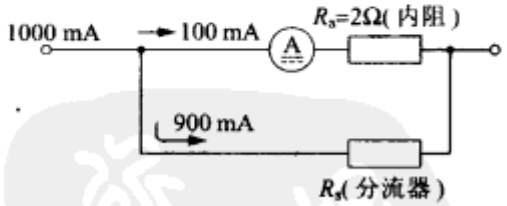


图 5.6　分流器

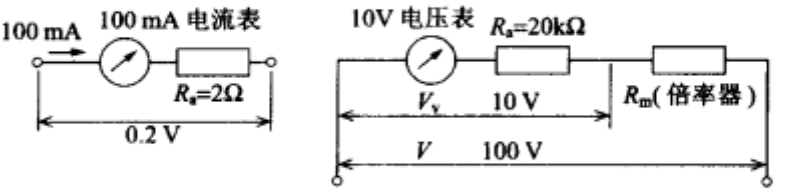
动圈式电压表

若动圈式电流表的内阻为 $R_a(\Omega)$，当在其两端施加电压 U 时，根据欧姆定律有 $V=IR_a$ 这一关系成立。

例如，如图 5.7(a)所示，在内阻为 2Ω，量程为 100mA 的电流表中流有 100mA 电流时，电流表本身按照 $V=IR_a$ 会有 $100\text{mA}\times2\Omega=0.2\text{V}$ 的电压同时被测量到。

因此，若仪表的刻度不是刻成 100mA 而是改为 0.2V，则 100mA 的电流表就变成了可测量 0.2V 的电压表。但

倍率器　是，测 0.2V 的电压表缺乏实用性，故应采用高电阻的倍率器 R_m 串联连接以扩展测量范围。



(a) 电压表的构成方法　　(b) 倍率器

图 5.7　倍率器

例　题

[1] 欲将内阻为 20kΩ 的 10V 电压表[见图 5.7(b)]改变成 100V 的电压表，其倍率器 R_m 应多大？

答　$m=\dfrac{V}{V_v}=\dfrac{100}{10}=10$

$R_m=R_a(m-1)=20\times 9=180\ (\Omega)$

相关知识

◆ 多量程电流表

实验中所使用的电流表，如图 5.8 所示，是具有一个“+”端和多个“−”端，这种电流表称为多量程电流表。该电流表内含不同倍率的多个分流器，并有与之相应的各种刻度。这对测量不同量程的电流是非常方便的。其最大额定值，就是刻度的最大值。

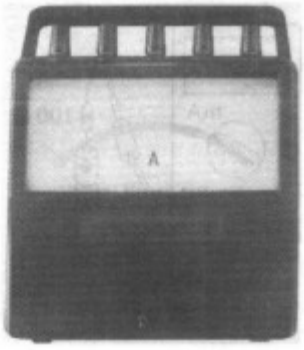
◆ 动圈式检流计

动圈式检流计是用于测量微小电流使用的，其动圈部分非常轻便。如图 5.9 所示，刻度中央为 0，与“+”、“−”相对应指针会左、右摆动，它在测量低电阻的电桥电路(见图 5.10)或测量线圈的感应电流的实验中经常使用。

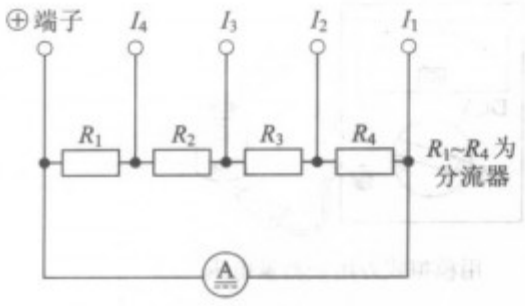
◆ 用万用表测量电压

万用表又称电路试验器，常用于电路的简易测量或是试制电路的检验等。

万用表有使用动圈式测量机构的模拟式和进行 A/D 变换以数字形式表示的数字式两种。



(a)



(b) 电路

图 5.8 多量程电流表



图 5.9 指针式检流计

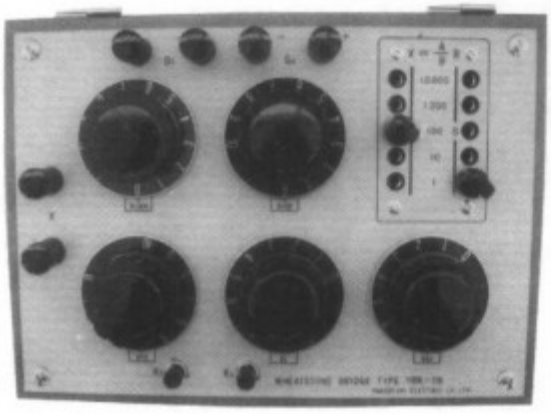


图 5.10 惠斯通电桥

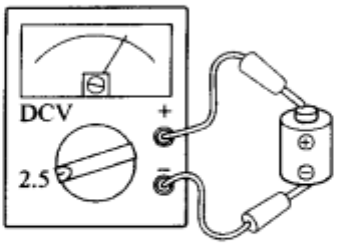
在测量电压时不论采用哪种形式的仪表，都要将其中心部位的开关放在电压测量挡，将测试棒触到待测处，读取测量值。

在使用模拟式时，若将“+”、“−”端弄错会使指针向左端甩去或烧损仪表。这时要将测试棒快速脱离测点。数字式因有极性表示，故可直接读取其数值。

用万用表测量电压的示例见图 5.11。

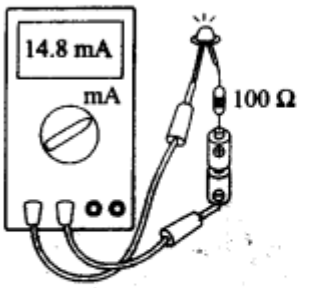
◆ 用万用表测量电流

将测量的挡位放在电流测量挡就可进行测量，如图 5.12 所示。



用模拟式万用表测量电压

图 5.11　用万用表测量电压



数字式

图 5.12　用万用表测量电流

3　交流电压、电流的测量

要　点

在测量交流电压、电流时，若使用与所测频率相适应的测量仪表会使误差减小。在测量频率为百 kHz 以下时可利用动铁式（电磁式）测量仪表，在更高频率时要使用整流式、热电式测量仪表。

解　释

动铁式测量机构的工作原理

如图 5.13 所示，令被测电流在固定线圈中流动，则由电磁作用在线圈中产生磁场。于是使线圈中的两枚铁片被同时磁化成 N、S 极，从而互相推斥。其中固定在线圈上的铁片不能动，另一片装在转轴上的铁片则运动，使指针按与被测电流的大小成正比而偏转，当与弹簧的反作用平衡时停止。

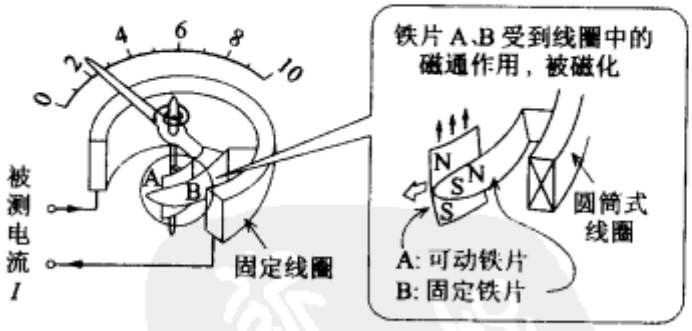


图 5.13　动铁式测量机构的构造

准确地说，是产生与电流的平方成正比的驱动转矩，但如果仔细设计铁片的形状，也能制成均匀的刻度。

磁滞损耗

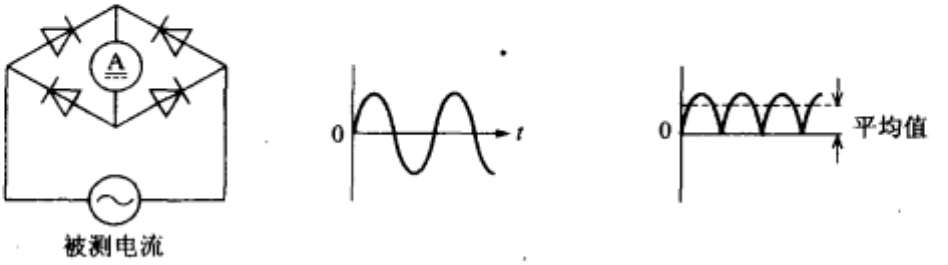
虽然从原理上说它也能测量直流，但因铁片有**磁滞损耗**的缘故而使误差较大。由于构造简单、坚固、便宜等原因，在工业频率范围（50Hz、60Hz）的电流、电压测量中应用较多。

整流式仪表

将被测对象的交流经二极管桥式整流电路变换成直流（见图 5.14），再用动圈式仪表显示测量值。由于显示的是被测交流的平均值，而交流测量应以反映有效值为主，故刻

度是按有效值而刻的。

因为用二极管整流，若交流波形不是正弦波会产生误差。在非正弦波的场合，可以使用下述热电式仪表。



(a) 电路　　(b) 被测电流波形　　(c) 电表中的电流波形

图 5.14　整流式仪表

热电式仪表

将流有被测电流的热导线与测量温度的热电偶一起装入一个密封的灯泡内成为真空热电偶[见图 5.15(a)]，再与动圈式仪表组合而构成。

即使被测交流波形有畸变，由于其产生的焦耳热与正弦波相同，故也能测得正确的测量值。还有，由于是变换成焦耳热进行测量，故不论对直流、交流均可使用。



(a) 真空热电偶　　(b) 热电式电流表的构成

图 5.15　热电式电流表

电动力式仪表

电动力式测量机构如图 5.16 所示，由于与负载串联连接的两个固定线圈和与负载并联连接的可动线圈中流动的待测电流所产生磁场的相互作用，使可动线圈运动，驱动指针偏转。

由于没有铁心，虽说对交流、直流均可测量，但若交流的频率在几百赫以上，则固定线圈的感抗就比较大而产生

误差。但在此频率以下，测量的误差不会超过 0.5%。

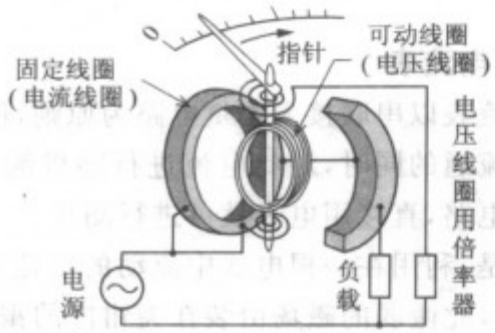


图 5.16　电动力式测量机构

因为测量结果能与电流和电压成正比，故称为电动力式功率表，常在功率测量中使用。

静电式仪表

将装设在绝缘容器中的两个相对的电极上施加高电压，就会产生静电力（库仑力）而使它们互相吸引。利用这种现象，制成一片电极固定，另一片活动的结构，并由此可动部分的滑动量使指针偏转（见图 5.17）。

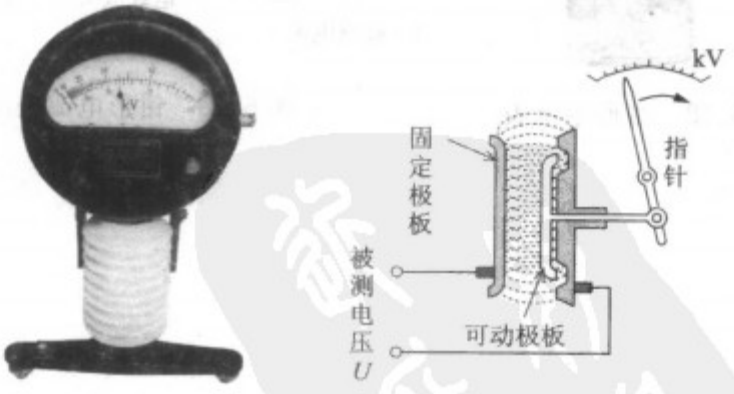


图 5.17　静电式电压表

虽然对交流、直流均能测量，但在低电压时驱动转矩太小，故适合在数 kV 以上的高电压测量时使用。

相关知识

◆ 钳形电流表

使用电流表以串联接入测量电路为原则，但在电气现场中很多情况下需要在实际电流流通的同时，对此电流进行随机测量。这种电流表（见图 5.18）可以不用切断电路，直接用电表就可进行测量。

其原理是，利用在一根电线中流动的电流和在其周围产生的微弱磁场，如图 5.19 所示，此微弱的磁场由装在夹钳内的霍尔元件检测，再经运算放大器放大、A/D 变换，从而进行测量和显示。测量值的表示方式可以是模拟式的，也可以是数字式的。



图 5.18　钳形电流表

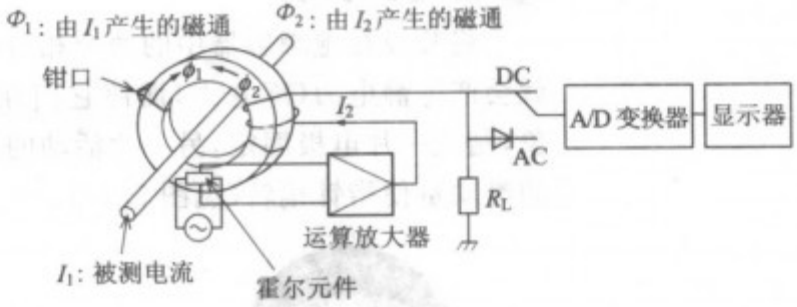


图 5.19　钳形电流表的工作原理

4　指示式仪表的分类与使用方法

要　点

用指针和刻度盘来表示被测电气量的仪器称为指示式仪表。指示式仪表可按其工作原理(见表 5.2)、仪表的允许误差(见表 5.3)、使用时放置的位置(见表 5.4)、适用的电路(见表 5.5)来分类。

表 5.2　按工作原理分类

种类	符号	适用的电路	工作原理与特点
动圈式		直流	基于永久磁铁和流有被测电流的可动线圈之间产生的电磁力的作用。价格便宜,灵敏度高
动铁式		交流	被测电流在固定线圈中流动产生磁场,使动铁片运动。结构简单、故障少。多用于工业频率的测量
整流式		交流	由二极管将交流进行整流,再用动圈式仪表指示。若交流有畸变,会产生误差
电动力式		交、直流	基于与负载串联连接的固定线圈和与负载关联连接的可动线圈中所流被测电流产生的磁场的作用,驱动指针偏转。测量功率时使用
热电式		交、直流	高频电流、电压测量时用。利用在一个灯泡内装入热导线和测量其所产生热的热电偶构成的真空热电偶。热电偶的输出由动圈式仪表指示。具有即使高频波形有畸变也可测量有效值的优点
静电式		交、直流	在 2 片电极上施加高电压,由于电极板的动作而使指针运动
感应式		交流	在铝质圈盘的上下装设电流线圈与电压线圈,由于所产生的磁场的作用使铝盘旋转,可测电能。如家用电度表

表 5.3　允许误差

准确度等级	允许误差	用　途
0.2 级	相对于最大刻度为±0.2%	副标准器用等
0.5 级	相对于最大刻度为±0.5%	精密测量用等
1.0 级	相对于最大刻度为±1.0%	携带式精密测量用等
1.5 级	相对于最大刻度为±1.5%	普通测量,配电盘式仪表等
2.5 级	相对于最大刻度为±2.5%	万用表等

表 5.4　使用时放置的位置

种类	符号
水平	⌐¬
垂直	⊥
倾斜(角度)	∠60°

表 5.5　适用的电路

种类	符号
直流	⎓
交流	~
直流、交流	≂
三相交流	≋

解　释

指示式仪表的分类

表 5.2 表示按指示式仪表的工作原理而进行的分类。

仪表的允许误差

允许误差

所谓仪表的**允许误差**，是指仪表所允许的误差范围或限度。具有刻度盘的仪表，是以相对于其最大刻度数值的百分数来表示的。例如，1.0 级的仪表，允许有±1.0%范围内的误差。因此，对最大 100V 的电压表，则有 2V 以内的误差。

刻度盘

在指示式仪表的刻度盘(见图 5.20)上，必定记有上述表中信息。在测量时，将成为计算误差的有效手段。

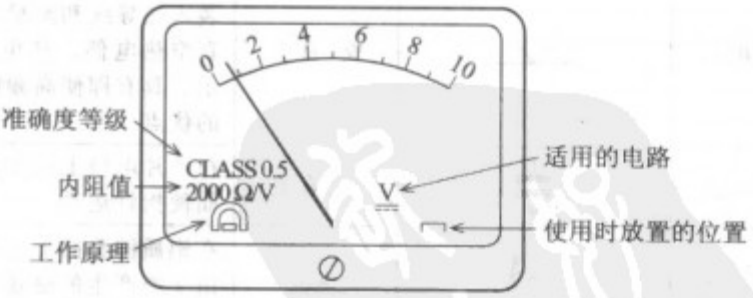


图 5.20　刻度盘

例　题

1 在下列所示的文字、图形的括号中，填入相应的符号或文字。

A：动圈式 (　　)　　B：整流式 (　　)

C：热电式 (　　)　　D： (　　)

E： (　　)　　F： (　　)

答　A：动圈式（）　　B：整流式（）

C：热电式（）　　D：（动铁式）

E：（电动力式）　　F：（感应式）

5　数字式仪表

要　点

所谓数字式仪表，就是对输入的模拟量进行测量、A/D变换处理，并以数字来表示测量值的测量仪表。其测量误差小，可进行高精度的测量。

解　释

数字式仪表的构成

温度、电压、电流、电阻等是模拟量(连续变化的量)。模拟量经传感器变换成电压或电阻值，再输入到数字电压表中。数字电压表将其用A/D变换器变换成数字值，并以数字来表示。图5.21表示其工作流程。

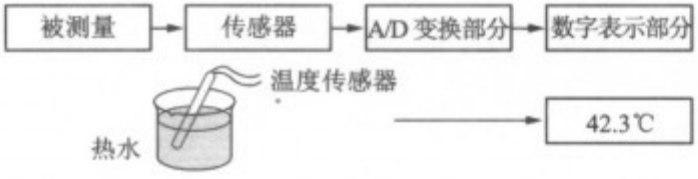


图5.21　数字式仪表的工作流程

数字式多量程测量仪表

数字式万用表

数字式多量程测量仪表



图5.22　模拟式万用表

万用表是现场中进行日常检测或简易测量时常用的仪表。其种类有模拟式(见图5.22)和数字式(见图5.23)两种。**数字式万用表**中，表示位数多的称为**数字式多量程测量仪表**(见图5.24)。表示位数多，就意味着测量范围广、测量精度高。如果在多量程测量仪表中附设以相应的传感器电路，就能方便地测量温度、转数、压力等。



图 5.23 数字式万用表



图 5.24 数字式多量程测量仪表

相关知识

◆ 数字式仪表的特点

① 输入阻抗大，不需要将被测电流的一部分能量作为仪表偏转的能量来消耗，因此测量较准确。

② 测量结果可用 4～7 位数字表示，能够进行高精度的测量。

③ 能自动进行量程切换、单位表示，读数误差小。

④ 可使测量仪表与微机相结合，进行连续地自动测量。

⑤ 在周期性的电流变化等情况下，数字的表示会不断变化，读数较困难。

◆ A/D 变换的运作

将模拟量变换成数字量称为 A/D 变换。其运作过程为：将某一模拟量在一定时间间隔（t_1 与 t_2）内作为输入信号进行测量，取得采样值（见图 5.25）。这称之为采样（抽样或标本化）。其次，将其数值大小量化。使量化后的数值成为脉冲或二进制数，这称为编码。

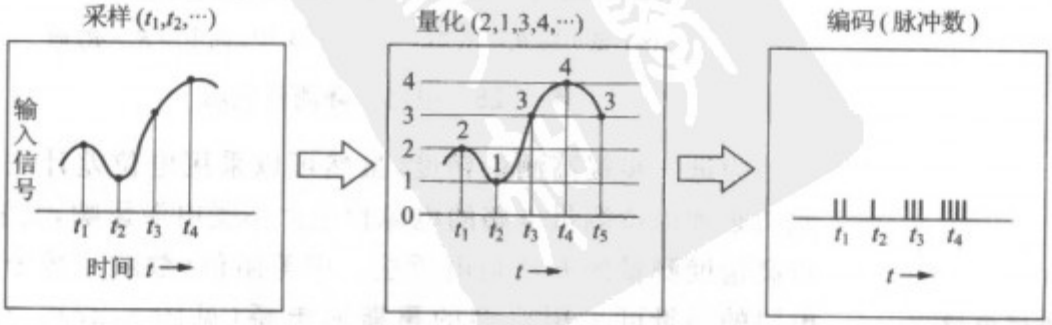


图 5.25 A/D 变换的运作

6　电阻的测量

要点

电阻的测量有压降法和电桥法。压降法易受电压、电流表的内阻和电源变化等影响，一般多用电桥法。根据被测电阻的高低，有若干种电桥法。

解说

电阻的测量

当在被测电阻 R_x 中流有电流 I 时，测出在 R_x 上产生的压降，就可以按下式求出 R_x：

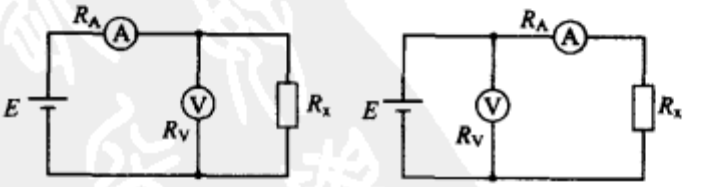
$$R_x=\frac{V}{I}\ (\Omega)$$

测量此压降 V 用电压表，测量已知电流 I 用电流表，称这种测 R_x 的方法为电压表-电流表法（见图 5.26）。图 5.26(a)表示测低电阻 R_x（$R_x \ll R_V$）时下式成立：

$$R_x=\frac{V}{I-\dfrac{E}{R_V}}\approx\frac{V}{I}\ (\Omega)$$

此外，图 5.26(b)表示测量中，高电阻 R_x（$R_x \gg R_A$）时下式成立：

$$R_x=\frac{V}{I}-R_A\approx\frac{V}{I}\ (\Omega)$$



(a) 低电阻 $R_x \ll R_V$ 时　　(b) 中、高电阻 $R_x \gg R_A$ 时

图 5.26　根据压降测量电阻

为进一步提高测量精度，虽然可以采用电位差计法，但此法必须保持测量电路的电源稳定。不受电源影响，又能进行高精度测量的方法是电桥法。中等阻值（数欧至数千欧）电阻的测量可采用典型的**惠斯通电桥**（见图 5.27）。在图 5.27 中，P、Q、R 为已知电阻，P、Q 为比例边，R 为电阻边。

惠斯通电桥

G是检测a、b点电位平衡用的检流计。调节R使a、b点的电位相等时，G的偏转为0。称这种状态为a点、b点的电位平衡，即$V_a=V_b$。

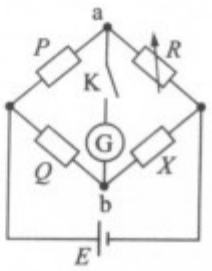


图5.27 惠斯通电桥

因

$$V_a=\frac{ER}{P+R}\ (\mathrm{V})$$

$$V_b=\frac{EX}{Q+X}\ (\mathrm{V})$$

故

$$\frac{ER}{P+R}=\frac{EX}{Q+X}$$

由此可得

$$PX=QR(\text{对边电阻的乘积相等})$$

$$X=\frac{Q}{P}R\quad(\Omega)$$

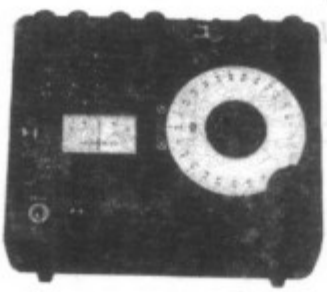
即可求出未知电阻X。此法的优点是能够排除电源的影响。

开尔文双电桥

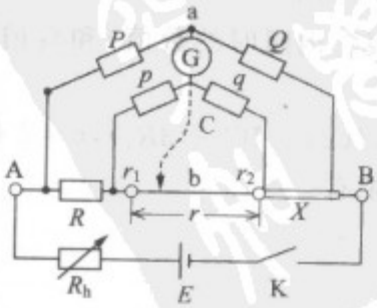
其次，为测量低电阻(1Ω以下)，可采用**开尔文双电桥**(见图5.28)。在图5.28(b)中，P、Q、p、q、r_1、r_2为已知电阻，r为滑线电阻。再有，P、Q、p、q、r_1、r_2为比例边，是连动的，即可保持

$$\frac{Q}{P}=\frac{q}{p}=\frac{r_2}{r_1}$$

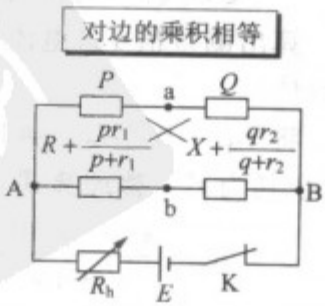
的关系。调节比例边，使a、b点的电位相等，则G的偏转为0。当a、b点的电位平衡时，对边电阻的乘积相等。因此有



(a) 外观



(b) 原理



(c) 平衡时的等效电路

图5.28 开尔文双电桥

$$P\left(X+\frac{qr_2}{q+r_2}\right)=Q\left(R+\frac{pr_1}{p+r_1}\right)$$

将 $r_1=\frac{p}{p+q}r$，$r_2=\frac{q}{p+q}r$ 代入上式，可得

$$X=\frac{Q}{P}R+\frac{pr}{p+q+r}\left(\frac{Q}{P}-\frac{q}{P}\right)$$

式中，$r=r_1+r_2$，$Q/P=q/p$，因此未知电阻 X 可由下式求出：

$$X=\frac{Q}{P}R\quad(\Omega)$$

因为此法亦为电桥法，故不受电源影响。

例　题

[1] 用惠斯通电桥法来测量未知电阻 X，若 Q/P 的比例为 100、$R=3.5$ 时，检流计 G 的偏转为 0，则 X 的正确数值是下列数值中的哪一个？

(1)0.35；(2)3.5；(3)35；(4)350；(5)3500

答　由 $X=(Q/P)R$ 可以求出 X。答案为(4)。

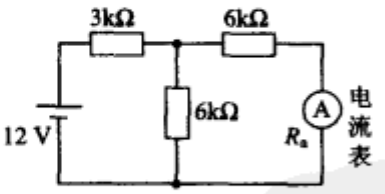


图 5.29　求电流表的内阻

[2] 当测量图 5.29 所示电路中 a、b 间所流过的电流时，为使因电流表 A 有内阻导致的误差不超过 2%，应限制电流表的内阻在多少(Ω)以下？试从下列数值中选出正确答案。

(1)80；(2)120；(3)160；(4)240；(5)300

思路　相对误差 ε 的定义为

$$\varepsilon=[(I_M-I_T)/I_T]\times 100$$

按题意应有

$$\varepsilon<[(I_M-I_T)/I_T]\times 100$$

算出测量值 I_M(电流表含内阻时的数值)和真值 I_T(电流表的内阻为 0 时的数值)。

将 $I_M=10^{-3}$ A，$I_T=12/(24\times 103+3R_a)$，$\varepsilon=2$ 代入上述定义式。因 ε 为负，令其为 ε'。整理算式，则有

$$R_a<\frac{\varepsilon'\times 8\times 10^3}{\varepsilon'+10^2}$$

忽略分母中的 ε'，则有

$$R_a<\frac{\varepsilon'\times 8\times 10^3}{10^2}=2\times 8\times 10=160$$

答 (3)

3 在图 5.30 所示电路中，a、b 为已知电阻，R_1、R_2、R_3 为未知电阻，EF 为滑线电阻。当将开关 K 倒向 A 侧使 S_1 与 E 点接触时，S_2 处于滑线电阻上 R 的位置。然后将 K 倒向 C 侧，使 S_2 在原位不动时 S_1 在滑线电阻上 r 的位置，这时 R_1 应为下列何值？

(1) $(b/a)r$。

(2) $(a/b)r$。

(3) $(b/a)R$。

(4) $(a/b)(R-b)$。

(5) $(b/a)(R-r)$。

思路 据题意将 K 倒向 A 时或倒向 C 时各电流值不变。理由是拨动 K 获得平衡时，检流计 T 中没有电流流动。令在 FED 中的电流为 I_1、在 FHD 中的电流为 I_2，则有

$$aI_1=bI_2,(a+r)I_1=(b+R_1)I_2$$

由此二式就可求出 R_1。

答 (1)

4 在图 5.31 所示电路中，各电阻值分别为 $P=8\Omega$、$Q=16\Omega$、$R=2\Omega$、$S=4\Omega$、$T=20\Omega$、$G=30\Omega$。则从 a、b 端看入的合成电阻是多少？试从下列数值中选出正确答案。

(1)5；(2)8；(3)10；(4)12；(5)15

思路 当在 a、b 间外加直流电源时，在 C、D 间没有电流。这是因为 $PS=QR$(对边电阻乘积相等)。由此就可求出 ACB、AB、ADB 三边并联的合成电阻。

答 (1)

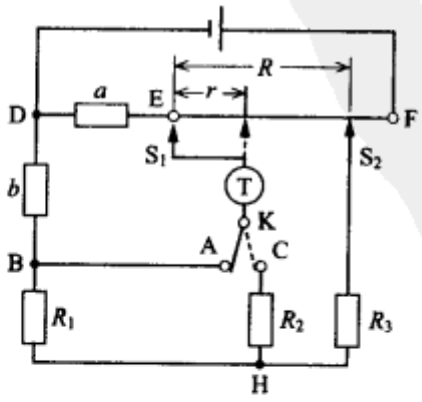


图 5.30 测求 R_1

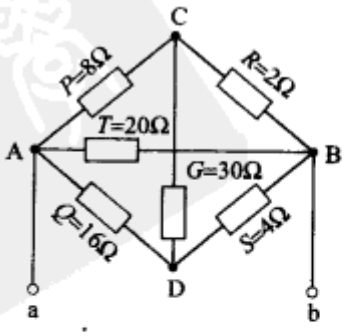


图 5.31 求合成电阻

7 电位差计

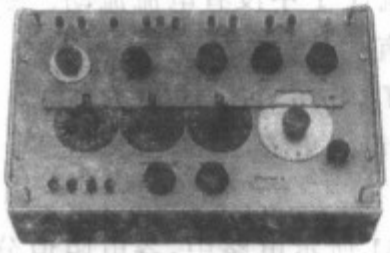
要 点

测量微小电压可用直流或交流电位差计。其原理是令已知电动势与未知电动势平衡来进行测量。在测量小电流时要用检流计。

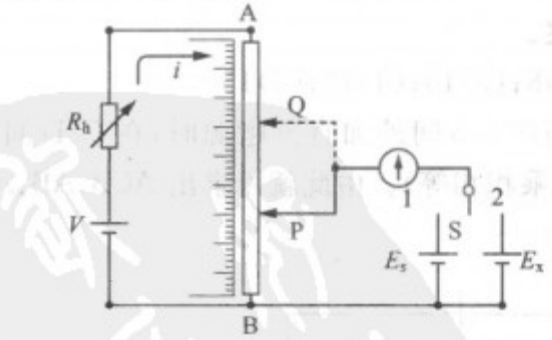
解 释

电位差计的构成

图 5.32(b)表示直流电位差计的电路，事先调整调节电阻 R_h，使在滑线变阻器中流有适当的电流。设 A、B 之间每 1cm 的电阻值为 $R(\Omega/\text{cm})$。



(a) 外观



(b) 原理

图 5.32 电位差计

首先，将开关 S 倒向 1 侧，旋动滑线变阻器的旋钮，使检流计的偏转为 0。设在 P 点为 0，测出 B、P 间的长度，设为 L_1(cm)，则 B、P 间的电阻为 $RL_1(\Omega)$。因此有

$$E_s = IRL_1 \quad (\text{V}) \tag{5.1}$$

其次，将 S 倒向未知电动势的 2 侧，实行同样的操作，设在 Q 点指针偏转为 0。测量 B、Q 间的长度，设为 L_2(cm)，

则 B、Q 间的电阻为 $RL_2(\Omega)$。由此可知

$$E_x = IRL_2 \ (\mathrm{V}) \qquad (5.2)$$

由式(5.1)、式(5.2)可知

$$\frac{E_x}{E_s} = \frac{IRL_2}{IRL_1}$$

$$E_x = E_s \frac{L_2}{L_1}$$

如果事先在 A、B 之间刻好电位差计的刻度(cm)就能根据 L_1 与 L_2 之比求得 E_x。

实际的电位差计如图 5.32(a)所示。精密的直流电位差计,其测量范围达有效数字 4 位以上,可测数 mV 至数 V 的电压。交流电位差计,其原理虽与直流电位差计相同,但在测量时除了要使电位差的大小平衡之外,还要使相位平衡。同时,操作也复杂,故不常采用,还是使用灵敏度稍差的振动式检流计为多见。

相关知识

◆ 检流计

检测平衡所使用的检流计,有直流检流计和交流检流计。在直流检流计中,要用动圈式测量机构。在可动部分有装设镜子的光照式检流计和用指针取代镜子的指针式检流计。现在已几乎不使用光照式检流计。指针式检流计,具有在强永久磁铁的气隙中悬挂动圈的结构,这样可使动圈的惯性减小。在使用中,由于动圈在磁场中左、右摆动,线圈自身会产生感应电动势。此电动势对指针的运动起阻尼作用。检流计的灵敏度(指针偏转 1 个刻度所必需的电流值)为 10^{-6} A 级。

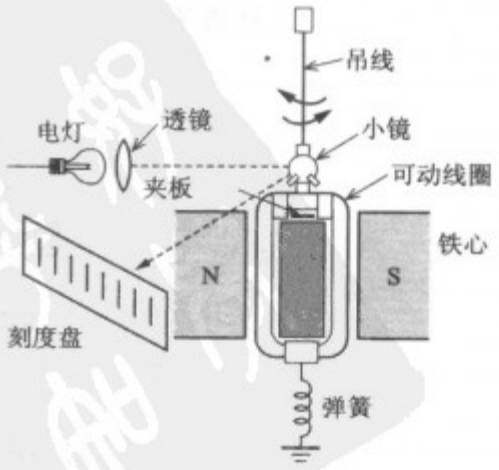


图 5.33 光照式检流计的原理

图 5.33 表示光照式检流计的原理。

8　高电压、大电流的测量

要　点

为测量直流的高电压与大电流，可以使用测试器的高压探针以及各种测量仪表，并附设外用的倍率器、分流器以扩大测量范围等方法。另外，在测量交流的高电压与大电流时，还可采用作为仪表用变压器的电压互感器和电流互感器。

解　释

直流高电压与大电流的测量

在电视机内，有“高压注意”字样。布劳恩管的阳极电压会产生超过 20kV 的高压。为测此电压，需要使用测试器的高压探针（内含 500～1500MΩ 的高阻倍率器）。在使用高压探针时，能够用测试器方便地测量到 30kV 电压。

此外，测量直流高电压的典型指示仪表，还有静电式电压表，其原理如同永久磁铁的 N 极与 S 极具有吸引力那样，在电极板上施加电压后就产生**静电力**（库仑力）。把弹簧连接到可动电极上，利用由于此静电力的作用而使电极移动的力，就可以测量电压。静电式电压表的原理如图 5.34 所示。这种静电式电压表除了能测直流电压外，还能测量交流电压（有效值）。

静电力

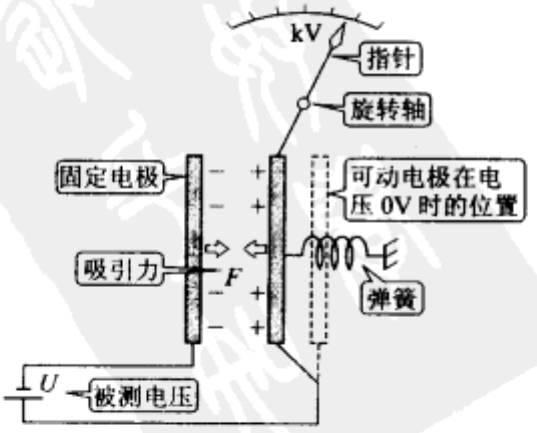


图 5.34　静电式电压表的原理

（摘自《絵ときでわかる電気電子計測》，p. 43 图 2(a)，オーム社）

在测量直流 100 至数千安的大电流时，由于分流器产生的焦耳热较多，需要使用外带的分流器（为使其散热效果好，外形要尽量大）。在这种测量中，要使用毫伏计来测量分流器的压降并指示为电流值。

交流高电压与大电流的测量

在发电厂等场所，会有交流几百千伏的高电压产生，以及几千安的大电流流动。为了安全地测量这些高电压、大电流，要利用仪表用变压器（VCT）将其变成 110V，5A 的低电压、小电流，就可用配电盘的电压表与电流表进行测量。仪表用变压器包括测电压用的**电压互感器**（VT）与测电流用的**电流互感器**（CT），图 5.35 表示仪表用变压器的原理。

电压互感器

电流互感器

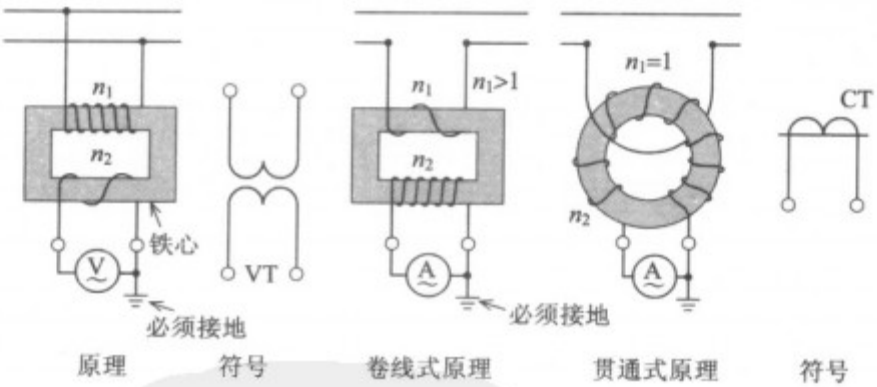


图 5.35 仪表用变压器的原理

带有钳形探头的电流表

在测量输电线的交流电流时，由于不可能切断电路接入电流表，故采用带有**钳形探头**的电流表。图 5.36 表示其工作原理。这时应该注意，在放入导线时，要尽可能让导线垂直钳平面，并使导线尽量放在钳内中心位置以进行测量。最近，交、直流两用的**数字式钳形电流表**已投入使用。

钳形探头

数字式钳形电流表

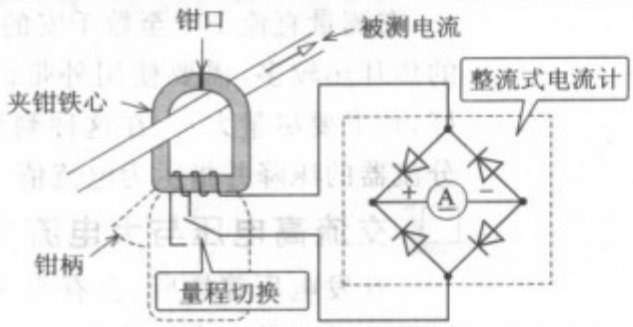


图 5.36　带有钳形探头的电流表的原理

（摘自《絵ときでわかる電気電子計測》，p. 46，图 6(a)，オーム社）

9 阻抗的测量

要 点

测量低频时的 L、C、R 和阻抗，可使用交流电桥或 LCR 测量仪。

解 释

交流电桥

交流电桥的基本电路，如图 5.37 所示。这种电桥被称为阻抗电桥或万能电桥。表 5.6 中表示的交流电桥，是适用于测量 L、C、R 的各种电桥。在实际测量 L 时，由于内含有效电阻(交流电阻)，故为测量与电抗一起的合成阻抗。此外，实际测量 C 时也因含有损耗电阻之故，亦为测量与电抗一起的合成阻抗。实际的 L 与 C 的等效电路与损耗率示于表5.7 中。

电桥的电源与平衡

如图 5.37 所示，使用波形无畸变的 400Hz 或 1kHz 的正弦交流电源。利用标度盘调整各边的阻抗，使检测器的电压为 0、电桥平衡。在检测器用受话器时，若听不到声音电桥即为平衡。交流电桥的平衡条件如下：

$$Z_A Z_C = Z_X Z_B \text{ 或 } Z_X = \frac{Z_A}{Z_B} \cdot Z_C$$

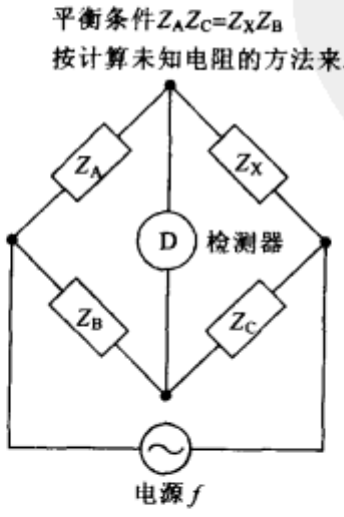
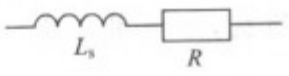
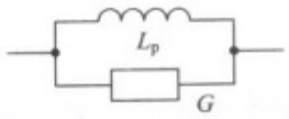
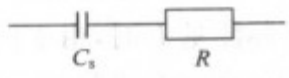
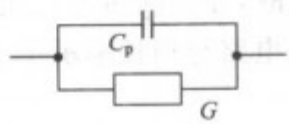


图 5.37 电桥的基本电路

表 5.6 各种交流电桥

电容的测量	文氏电桥
	卡利-福斯特电桥
	西林电桥
自感的测量	麦克斯韦电桥
	安得生电桥
	海维赛-坎贝尔电桥
互感的测量	海维赛电桥
	菲利西电桥
交流阻抗的测量	考劳希电桥

表 5.7　实际线圈与电容器的等效电路及损耗率

测量对象	等效电路	$Z/\Omega, Y/S$	损耗率 D	备注
线圈 L		$Z=R+j\omega L_s$	$D=\dfrac{R}{\omega L_s}=\dfrac{1}{Q}$	当 $1\gg D$ 时，$L_s=L_p$
		$Y=G-j\dfrac{1}{\omega L_p}$	$D=\omega L_p G=\dfrac{1}{Q}$	
电容器 C		$Z=R-j\dfrac{1}{\omega C_s}$	$D=\omega C_s R=\dfrac{1}{Q}$	当 $1\gg D$ 时，$C_s=C_p$
		$Y=G+j\omega C_p$	$D=\dfrac{G}{\omega C_p}=\dfrac{1}{Q}$	

LCR 测量仪

利用标度盘调整交流电桥使之平衡，对于初学者较为困难。因此，通常测量 L、C、R 多采用操作简单、能在短时间内测定（准确度为 $\pm 0.05\%\sim 0.3\%$，万能电桥的准确度为 $\pm 0.5\%$）的以数字表示的 LCR 测量仪。图 5.38 表示 LCR 测量仪的工作原理。由于使用了运算放大电路，故可根据运算放大器的输入电压 V_i 与输出电压 V_o 之比求出阻抗或是导纳。

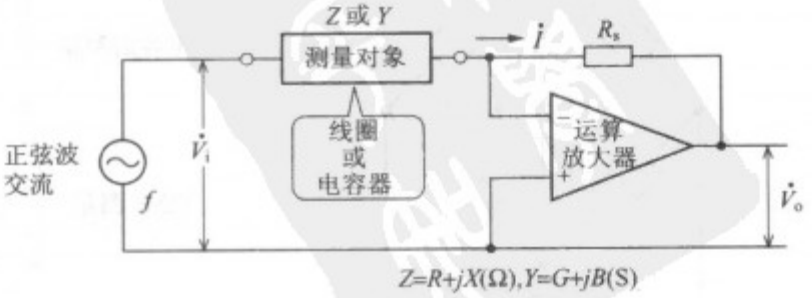


图 5.38　LCR 测量仪的工作原理

（摘自《絵ときでわかる電気電子計測》，p. 104，图 5，オーム社）

10　功率、电能的测量

要　点

需要测量的功率有直流功率和交流功率。交流功率又分为单相和三相，主要测量三相功率。对于电能，则是测量所使用的功率与时间的乘积值。

解　释

直流功率的测量

测量直流功率时，广泛使用电动力式仪表。其构造如图5.39所示。将可动线圈装在固定线圈内，当各线圈中有电流流动时，在两个线圈间产生电动力。将固定线圈作电流线圈、将可动线圈作电压线圈使用，就构成电动力式功率表。这种功率表内没有铁心，能够作为直流、交流两用。图5.40表示用电动力式仪表测量功率的电路。

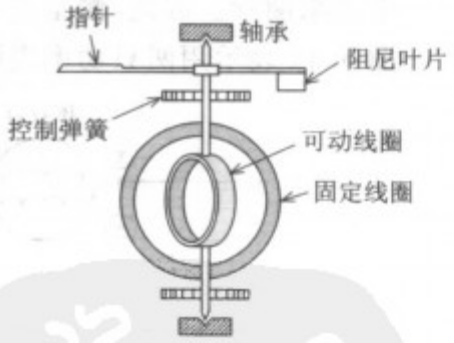


图5.39　电动力式仪表的构造

（摘自《絵ときでわかる電気電子計測》，p.33，图1(a)，オーム社）

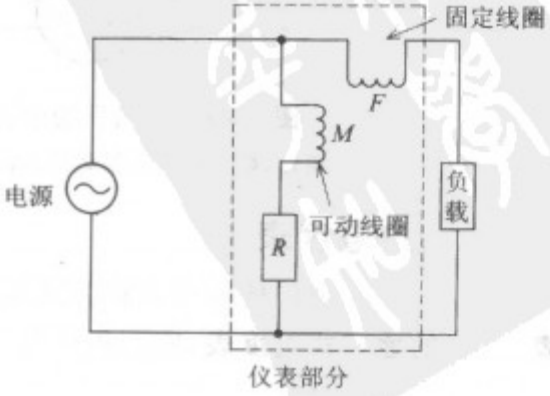


图5.40　用电动力式仪表测量功率的电路

单相交流功率的测量

最近，测量单相交流功率已使用数字式功率表，有功功率、电能、电压、电流等均可测量。图 5.41 表示数字功率表的原理。功率是电压与电流相乘后的合成。由 B_1 至 B_3 进行 A/D 变换，同时取得有效值等，以便进行各种处理。

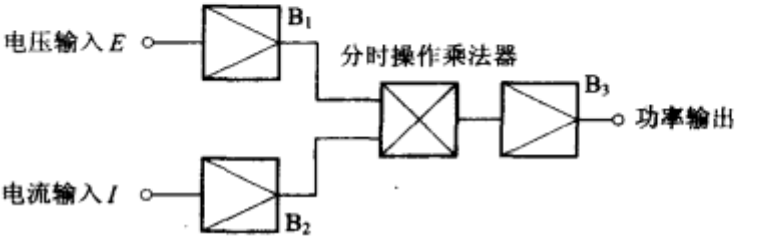


图 5.41　数字功率表的原理

三相交流功率的测量

布朗德尔定理

根据**布朗德尔定理**，n 相的交流功率可以用 $n-1$ 个功率表来测量。因此，测量三相交流功率需要用两只功率表。图 5.42 表示用两只功率表测量三相功率的原理。

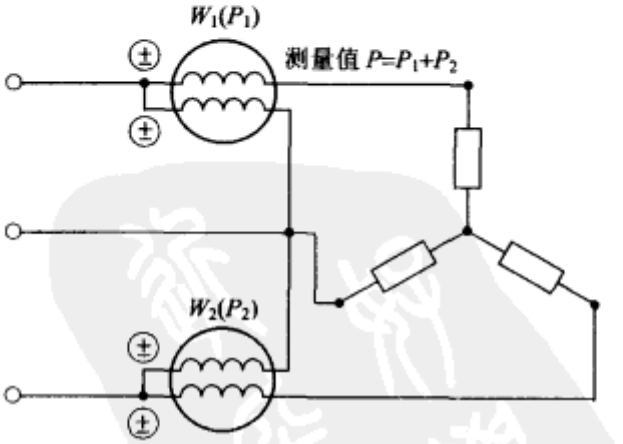


图 5.42　用两只功率表测量三相功率的原理

（摘自《新しい電気基礎②》，p. 143，图 13.9(a)，オーム社）

电度表

阿拉戈原理
感应式电度表

家庭内所装设的积算式电度表，是利用**阿拉戈原理**制作的**感应式电度表**，应用很广泛。图 5.43 表示其构造。

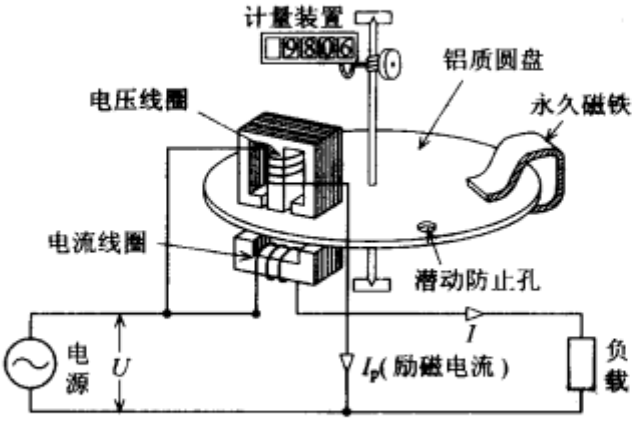


图 5.43　感应式电度表构造

（摘自《絵ときでわかる電気電子計測》，p. 36，图 7，オーム社）

11　磁的测量

要　点

小型变压器的铁心中使用的电磁钢片，要求磁感应强度高、磁导率高、铁损少。为掌握铁心等磁的性质，就要进行磁场（磁通、磁感应强度）、B-H 曲线及铁损等测量。

解　释

高斯计

测量磁感应强度的仪表有利用霍尔元件制作的高斯计。通常，霍尔元件中流有一定的交流 1kHz 电流，若使待测的磁通在与霍尔元件平面成直角方向进入，则在与电流端子成直角方向的电压端子上产生霍尔电动势，如图 5.44 所示。此电动势与磁感应强度成正比。霍尔元件为薄片形状，装入探头前端。在测量磁通时，必须使霍尔元件的平面与此磁通成直角放置。图 5.45 表示**高斯计**的原理。

高斯计

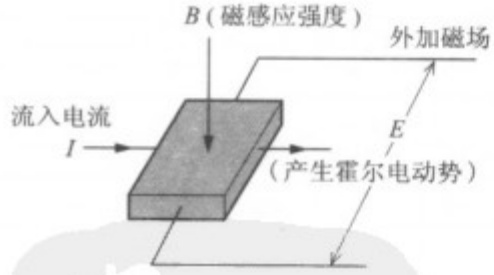


图 5.44　霍尔效应

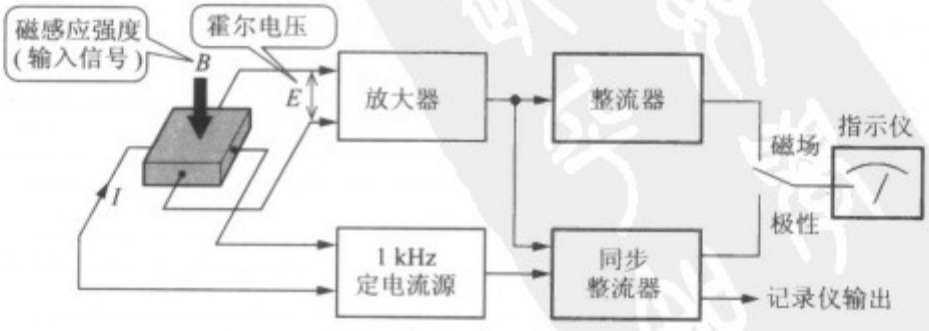


图 5.45　高斯计的原理

（摘自《絵ときでわかる電気電子計測》，p. 49，图 2(a)，オーム社）

另外还应指出，高斯计测量的量是磁感应强度 B(T)

(特[斯拉]),因此在 SI 单位制中准确的称呼应是特斯拉计,但出于习惯仍以 CGS 单位制的高斯(G)来刻度(10^4G = 1T)。

交流磁化特性的测量

交流磁化电流

在待测试件的环状铁心线圈中流动的**交流磁化电流**(所产生的磁场强度为 H)与其所产生的磁通(磁感应强度为 B)之间的关系,称为**磁滞回线**(B-H 曲线)。测量 B-H 曲线的方法如图 5.46 所示,要使用**示波器**。

磁滞回线

示波器

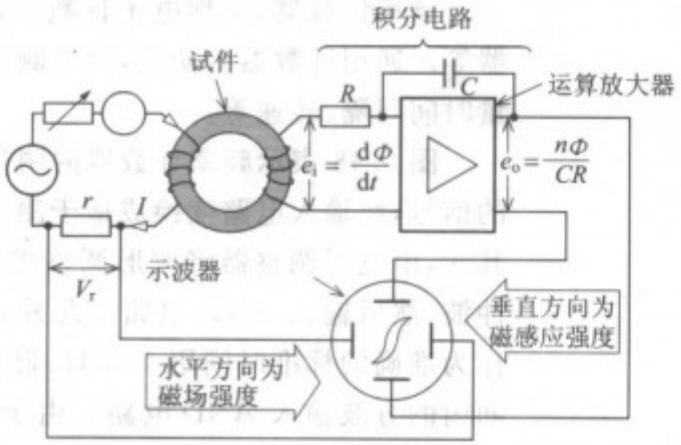


图 5.46 用示波器测量铁心的 B-H 曲线

(摘自《絵ときでわかる電気電子計測》,p. 52,图 7(a),オーム社)

爱泼斯坦装置

如果把变压器和异步电动机等交流电机的铁心材料放于交流磁场中,就会产生与 B-H 曲线面积有关的热(磁滞损耗),同时在导电的磁性材料中还会有感应电流流动产生的热(涡流损耗),这两种损耗合称铁损。测量这种铁损,通常使用爱泼斯坦装置。图 5.47 表示用**爱泼斯坦装置**测量铁损的电路。

爱泼斯坦装置

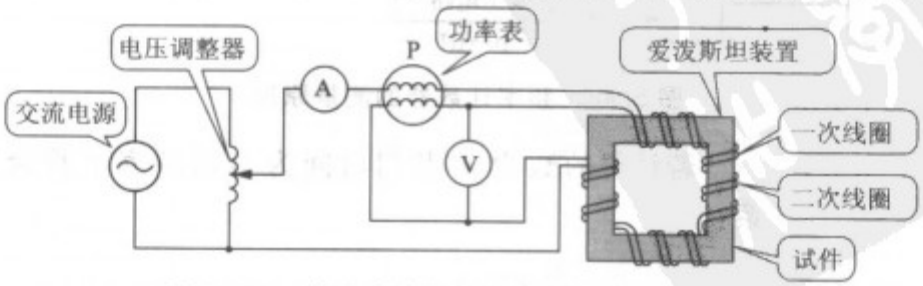


图 5.47 利用爱泼斯坦装置测量铁损的电路

(摘自《絵ときでわかる電気電子計測》,p. 53,图 10,オーム社)

12　由低频到高频的频率测量

要　点

最近，已成为主流的频率计，是数字式频率计数器。其特点是，测量范围从低频到微波带的宽广范围频率均可测量。此外，测量精度非常高，操作简便，价格便宜。

解　释

频率计数器(计数式频率计)的原理

频率计数器，又称电子计数器，简称计数器或通用计数器等。通用计数器的功能，除可测量频率、周期之外，还可测量时间间隔、转速等。

图 5.48 表示频率计数器的测量原理。由测量端子输入的信号，经输入电路变换成适于测量的数值，然后予以放大。其次，由波形调整器将波形调整成方波，经微分电路变成脉冲波，然后输入 AND 电路。此外，由标准石英振荡器产生作为准确的标准时间用 10MHz 脉冲，利用分频器将开门时间内的方波输入 AND 电路。由于此 AND 电路的作用，输出计数信号脉冲。利用计数器将此脉冲计数。从而表示频率。

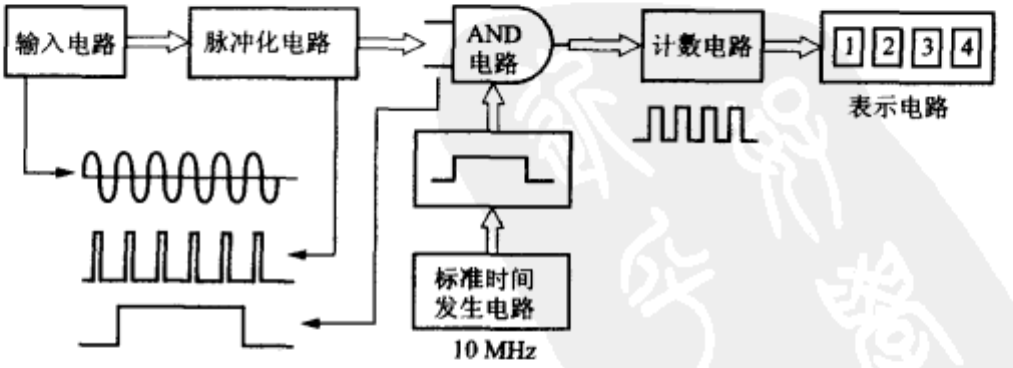


图 5.48　频率计数器的测量原理

若计得的数为 n，开门时间为 t，则频率 f 符合下列关系：

$$f=\frac{n}{t}\ (\mathrm{Hz})$$

例如，计得的数为 168 个，开门时间为 0.01s 时，频率为

$$f=\frac{168}{0.01}=16800\text{Hz}=16.8\text{kHz}$$

相关知识

◆ 频率计数器的校正

频率计数器是将石英振荡器作为标准量来测量频率或周期。如果这个石英振荡器不准确，测量结果就会产生误差。为此，如图 5.49 所示，通常要用标准电波对频率计数器的石英振荡进行准确校正。日本的标准电波，由独立行政法人通信综合研究所标准频率发信所在福岛县(40kHz)和佐贺县(60kHz)的高山上发射。

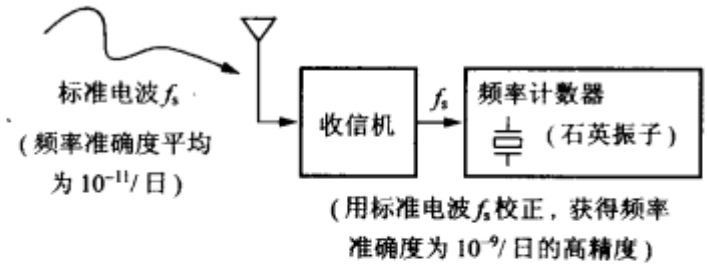


图 5.49　用标准电波校正石英振荡器

例 题

[1] 使用数字式频率计数器，若设定的选通脉冲时间为 200μs，计得 n 个脉冲，频率计显示 840kHz，则此时的脉冲数 n 为多少？

答　由 $f=\frac{n}{t}$(Hz)可知

$$n=f\times n=840\times10^{3}\times200\times10^{-6}=168(\text{个})$$

13　波形的测量

要　点

波形的测量，可以使用笔式记录仪、*X-Y* 记录仪、示波器。使用示波器，有直接同步方式和触发同步方式，可以测量电压、周期、时间宽度及相位等。

解　释

笔式记录仪与 *X-Y* 记录仪

在工厂等场所的电气室中，有记录仪在工作着。记录仪的数据可作为资料保存或发生事故时分析原因时使用。在记录仪中，有受电压或电流的能量驱动使记录仪的指针（笔）偏转的**直动式记录仪**和将电气信号施加到差动放大器中，受伺服电机作用驱动指针的**自动平衡记录仪**。图 5.50 表示电位差式自动平衡记录仪的原理。

直动式记录仪
自动平衡记录仪

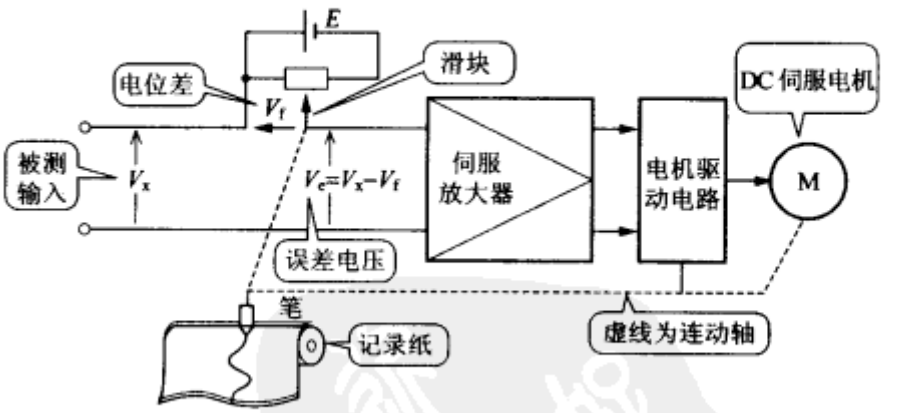


图 5.50　电位差计式自动平衡记录仪的原理

（摘自《絵ときでわかる電気電子計測》，p. 136，图 3，オーム社）

此外，还有在 *X* 轴和 *Y* 轴上装设伺服机构，将两个变化量之间的相互关系记录下来的 *X-Y* 记录仪。图 5.51 表示 *Y-Y* 记录仪的原理。

示波器

电子枪
垂直偏转板
水平偏转板
荧光屏

使用示波器有直接同步方式和触发同步方式，图 5.52 表示其基本构成与工作原理。由图可见它是由**电子枪**、互成直角关系放置的**垂直偏转板**与**水平偏转板**及**荧光屏**构成，用于高频波形测量。从显示的画面上，可以观测出高频的电压

值、周期、时间宽度、相位差等。当在垂直偏转板上施加被测信号、在水平偏转板上施加锯齿波状电压，并使电子枪发射电子流时，受偏转板的作用电子流的方向改变，射到荧光屏上，荧光屏接受电子流后，因涂有发光物质，故在画面上能显示出被测波形。

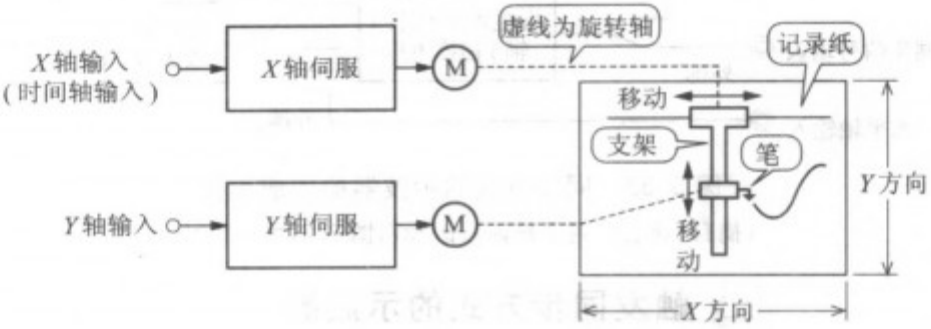


图 5.51 *X-Y* 记录仪的原理

(摘自《絵ときでわかる電気電子計測》，p. 137，图 4，オーム社)

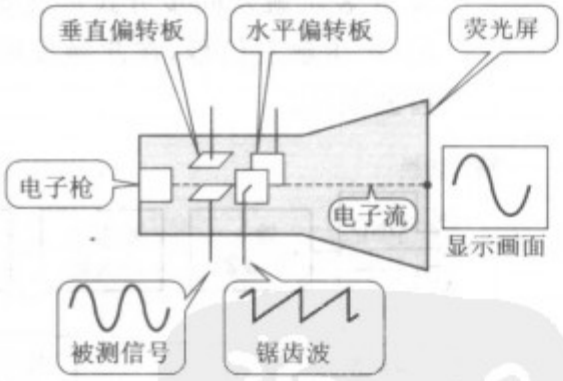


图 5.52 示波器的基本构造与工作原理

(摘自《新しい電子技術》，p. 236，图 8.1(a)，オーム社)

直接同步方式的示波器

直接同步方式

图 5.53 表示**直接同步方式**的示波器的构成示例。由于被测信号被水平的锯齿波反复地强制同步，故在显示画面上能在每次相同位置表示波形，可以观察到静止波形。直接同步方式，由于锯齿波的起始点不能任意选定，故不适用于观测仅有 1 次的波形、仅有 1 次的脉冲波形或是无周期波形与周期非常长的波形。

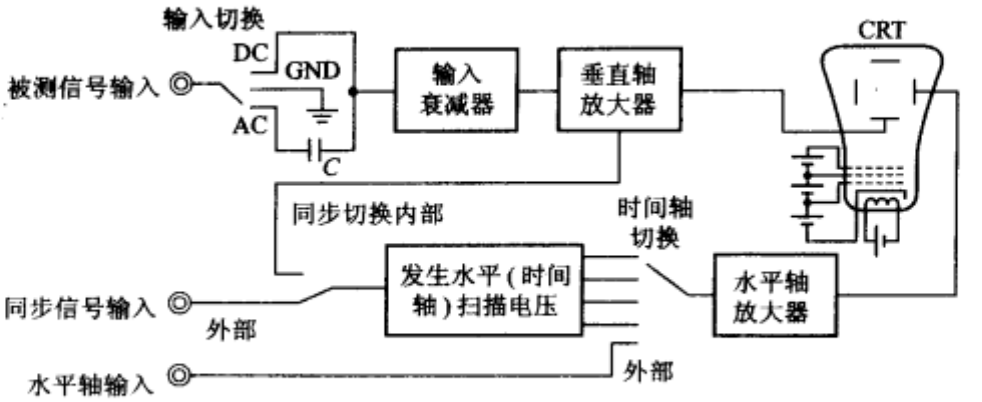


图 5.53　同步方式的示波器的构成示例

（摘自《新しい電子技術》，p. 237，图 8.2，オーム社）

触发同步方式的示波器

触发同步方式

在用示波器观测波形时，不采取同步方式显示的波形是难以观测的。在取得同步的方法中，有**触发同步方式**。图 5.54 表示触发同步方式示波器的构成。由于被测信号的作用，产生触发信号，在此触发电压作用下产生水平扫描的锯齿波电压。

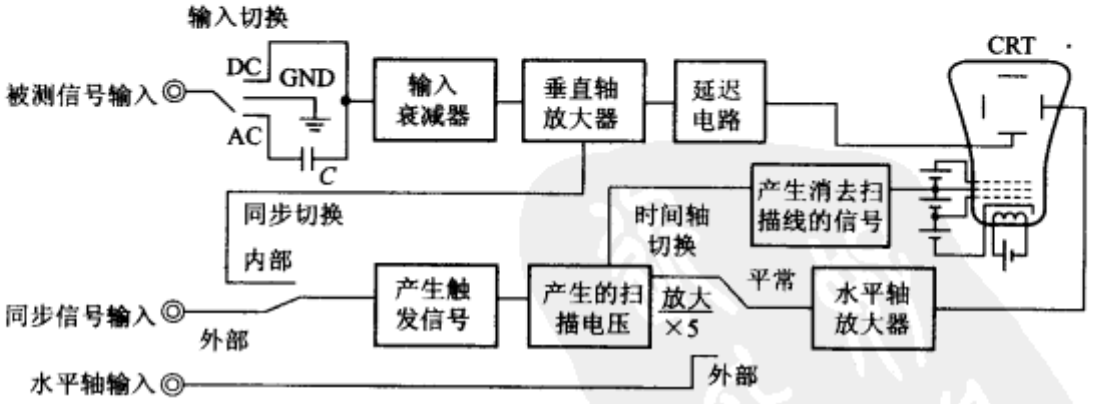


图 5.54　触发同步方式的示波器的构成

（摘自《新しい電子技術》，p. 238，图 8.4，オーム社）

具有高功能的示波器

在微机中采用的示波器，在显示波形的同时，还有测量和显示电压、周期、频率的功能。具有这种功能的机种称为带读出（数据）功能的示波器。此外，还有能观测过渡过程中产生的仅有 1 次的信号或非周期性信号的数字示波器机种。

由于这种波形数据为数字量，若将计算机与外部端子相接，就可在软盘等辅助记忆装置中保存数据，也可进行被测波形的数字处理。

例 题

[1] 某高频信号用示波器观测，得到如图 5.55 所示波形。试求此高频信号的振幅、周期、电压(有效值)、电压(峰-峰值)。已知垂直偏转灵敏度为 0.1V/div，水平扫描时间为 1μs/div。

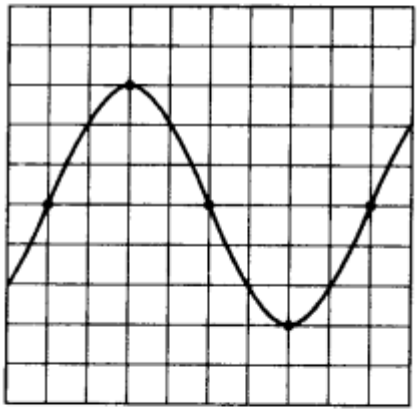


图 5.55 观测波形

答 按纵轴(垂直)的 1 格为 0.1V，横轴(水平)的 1 格为 1μs 计算，则有

振幅 $0.1\times3=0.3$ (V)

电压(有效值) $0.3\times\dfrac{1}{\sqrt{2}}=0.21$ (V)

电压(峰-峰值) $0.3\times2=0.6$ (V)

周期 $T=1\times8=8$ (μs)

频率 $f=\dfrac{1}{T}=125$ (kHz)

14　具有微机的电子测量系统

要　点

将微机与接口(电路)相连接,就可测量温度或照度等,并能廉价地构成微机处理系统。测得的模拟量经A/D变换,再经由互联网等输入到微机中。典型的接口(电路)是GP-IB等。

解　释

在电子测量中利用微机

由于微机已普及,在各领域中开发了各种应用方法。利用微机的优点是,能共同保存数据,对此数据能在短时间内进行加工。此外,经由互联网可以瞬间获得远距离的测量结果。利用微机的电子测量的优点还有,可进行自动测量,能保存庞大的数据,并可将此数据加工成人们易接受的形式。

具有微机的电子测量系统

图5.56是具有微机的电子测量系统示意。

传感器

被测量有温度、照度、压力、流量等。它们通过**传感器**变换成电气信号(如DC 0～5V,DC 4～20mA)。然后,此电气信号再变成数字送入微机中。



图5.56　具有微机的电子测量系统示意

测量仪器与微机连接的接口

一般地,在具有微机的电子测量系统中,是通过接口将A/D变换后的数据送入微机中。所谓接口就是为使微机与A/D变换器连接内设的装置(测量仪器)等所要遵循的一定规则而规定的通信协议。不同的测量仪器或不同的装置之间通过接口可以交换数据。在微机中常用的接口是RS-232C、GP-IB等。此外,作为微机的典型接口,还有

“centronics(微机-打印机接口)”。最近,作为微机标准装备的利用 USB 标准的廉价测量系统也已问世。

在具有微机的电子测量中使用的典型接口

“centronics”是 Centronics 公司开发的为使微机与打印机相连接的接口。此接口只能由微机向打印机单向连接。因此,一般在电子测量中,使用由测量仪器也可向微机传送数据的 RS-232C 或 GP-IP 作为接口。图 5.57 表示微机测量的连接形态。

RS-232C 是为使主机与末端的微机通过通信线相连接而开发的串行输送方式的接口。其特点是可双向通信,价格也便宜。

GP-IB 符合测量仪器与微机连接的规格。它是由 8 根信号线和 3 根传输控制线、5 根管理线构成,是并行输送方式。

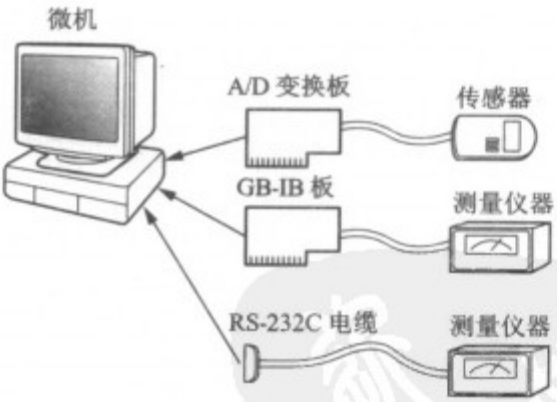


图 5.57　微机测量的连接形态

第6章

自动控制

● 责任编委
坂本宪昭
● 执　　笔
粉川昌巳(1～5)
昆　秀行(6～9)
日野安喜(10)
坂本宪昭(11～12)

自动控制，在空调机、洗衣机、微波炉等家电产品中；化工厂或汽车装配工厂、发电厂等所用的设备中；飞机或汽车以至机器人的操作中，都有广泛的应用。它在人与资源的省力、节能、提高生产效率等方面都作出了贡献。

本章中，将首先学习作为基本控制方式的反馈控制与顺序控制的原理与构成，在理解的基础上再学习如何利用可编程序控制器与微机来实现它们的方法等。

1　自动控制的分类

要　点

根据JIS的定义，控制就是“为达到某种目的对于对象所施加的操作”。

利用控制装置自动地进行控制称为自动控制。使控制量的值接近目标值的控制称为反馈控制，根据预定的顺序来控制状态的控制叫做顺序控制。

反馈控制

如图6.1所示，当运行中的车要保持40km/h的速度不变时，司机需目视速度计(测量)，与目标值(40km/h)比较(比较、运算)，若与目标值有偏差就调节加速器或制动器以增、减速度(操作)。

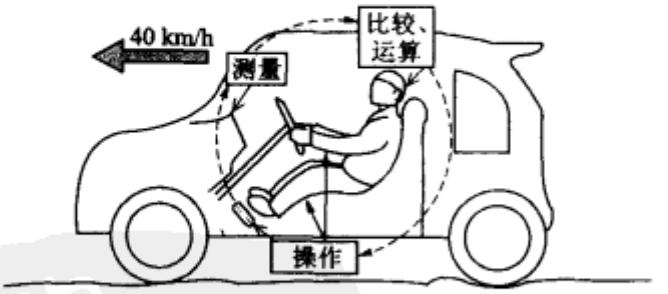


图6.1　反馈控制

反馈控制　就是像这样：测量→比较、运算→操作，如此反复，直到控制量的值与目标值一致为止的一种控制方式。

按控制量的性质不同，可将反馈控制分为下列情况：

过程控制　控制量为温度、湿度、压力、浓度等工业过程的状态量，对其进行控制。

伺服机构　将物体的位置、角度等机械的变位作为控制量进行控制。

自动调整　控制量为电压、频率、转数等参数的控制。

按目标值的性质不同，可将反馈控制分为下列几种。

定值控制　目标值为一定时的控制。

追值控制 目标值变化的控制，可分如下几种：

随动控制 像雷达自动跟踪飞机一样，目标值任意随时间变化时的控制。

程序控制 像热处理炉的温度控制一样，目标值按预先规定的时间变化时的控制。

比例控制 像锅炉中的空气与燃料之比保持一定一样，目标值与某种其他量按一定比例关系变化时的控制。

顺序控制

如图 6.2 所示，当机器人由 a 地向 b 地运积木时，机器人必须完成下列动作：

① 手臂举到 a 地上方。

② 伸开手掌，接近积木。

③ 抓住积木。

④ 将积木上举。

⑤ 移动手臂到 b 地上方。

⑥ 手臂下放。

⑦ 手掌松开积木。

⑧ 手臂上举。

以上移动积木的这八个步骤，机器人必须能够记住并依次执行。

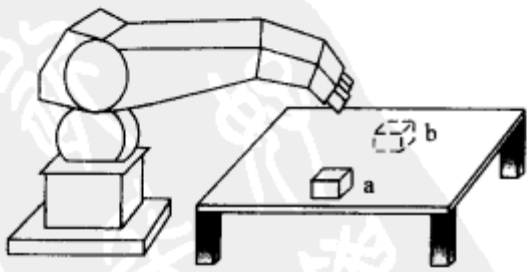


图 6.2 顺序控制

顺序控制就是像这样，使某件工作能按规定的步骤去完成，即控制状态的方式。这种控制方式首先用于工厂自动化，也用在自动售货机、全自动洗衣机等常见机器中。

2　反馈控制

要　点

反馈控制是使控制量与目标值相比较，并为使控制量与目标值一致要经常进行修正操作的控制，由闭环构成。

反馈控制的操作有开关调节、比例调节、微分调节、积分调节等，可由这些操作构成最佳控制系统。

解　释

反馈控制系统的构成

反馈控制要经常测量控制的结果，将其与目标状态作比较，进行使控制量与目标值一致的修正操作。由于是闭环连续工作，所以称为**闭环控制系统**。图 6.3 表示反馈控制系统的构成。其各部分的作用与信号的意义如下：

比较部分　由目标值与反馈信号求得控制偏差的部分。

控制对象

控制部分　将控制偏差放大后施加到**控制对象**上。

检测部分　检测出控制量，并变换成可与目标值比较的量。

目标值　作为控制量所要达到的目标的给定值。

控制偏差　目标值与控制量之差。

操作量　为进行控制所加给控制对象的量。

控制量　在属于控制对象的量之中，能够对其进行控制的量。

反馈信号　为使控制量的值能与目标值比较而提供的信号。

外界干扰　使控制系统的状态紊乱的外界作用。

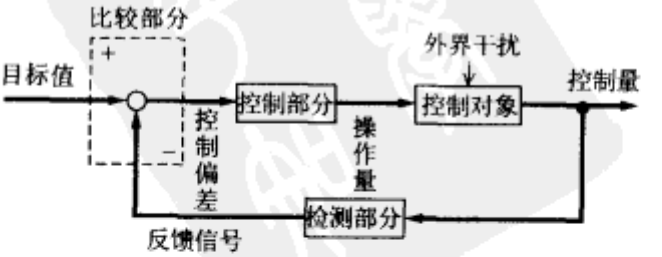


图 6.3　反馈控制系统的构成

控制动作

控制动作可分为下列几种：

(1) 不连续动作

开关调节(2 位调节) 操作量或支配操作量的信号，按输入的大小由预定的两个定值进行调节。这种调节作用的控制结果如图 6.4 所示。

多位调节 将操作量设为 3 个以上的阶段，逐一进行调节。

(2) 连续动作

比例调节 使输出信号与控制偏差信号成正比的调节作用称为**比例调节**(proportional position action)，简称 P 调节。

比例调节

现在来考虑图 6.5 所示控制系统中，控制部分的放大系数为 G 时输入与输出的关系。设目标值为图示阶跃信号。

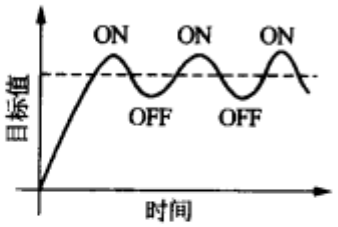


图 6.4 双位调节

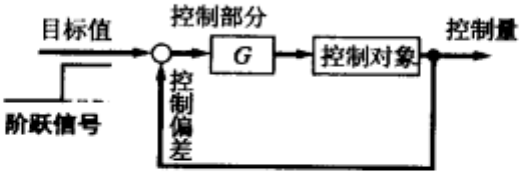


图 6.5 比例调节的构成

图 6.6 表示当 G 变化时响应的情况。在 G 较小时，输出达不到目标值就会停止下来。当 G 增大时，输出会向目标值冲过头而后返回再静止。如 G 再增大，则会产生振荡，即 G 若过大则输出会不稳定。

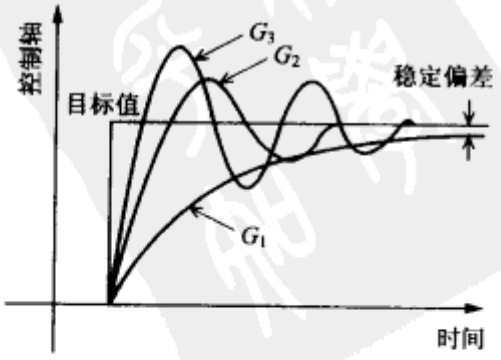


图 6.6 比例调节

由上述可知，随着 G 值的不同，响应将对应输出的目标值而变化。但这并未满足到达目标值很快停止的要求。将这个 G 称作**比例增益**。

比例增益

比例调节时若控制偏差小于某一程度，就会使控制部分没有反应，从而不产生调节作用，因此会残留稳定误差。为使稳定误差消失，就要求比例增益为无限大，但比例增益过大会造成不稳定，使特性发散。

微分调节　由比例调节可知，若 G 增大则响应上升加快，同时离开目标值的**超调量**也增大。为此要考虑一种能随着 G 的增大响应迅速上升，但超调量又较小的方法。

超调量

这种方法就是在防止振荡发生、又要随时修正超调量时，采取与偏差的变化成正比的制动操作，以求系统稳定。这种与偏差变化成正比的制动操作称为**微分调节**(derivative control action)，简称 D 调节。

微分调节

偏差信号

图 6.7 所示为将与图 6.5 所示比例调节中**偏差信号**的变化率(微分值)成正比的输出信号用作微分调节的情况，F 称为**微分增益**。

微分增益

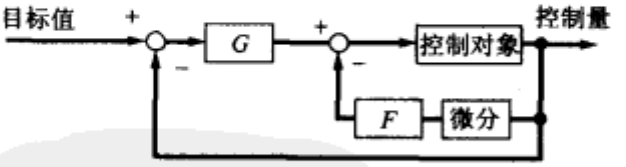


图 6.7　微分调节的构成

由于微分调节能从现在的偏差信号，预测将来的偏差信号大小从而改正调节动作，故稳定性高。图 6.8 表示 G 一定

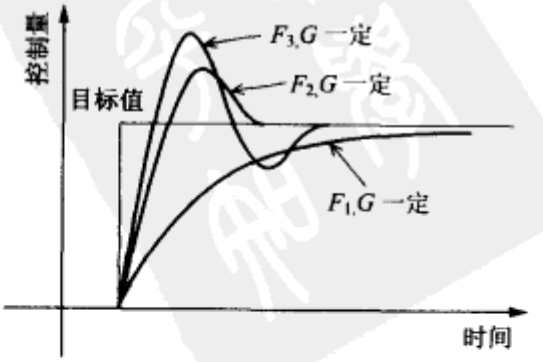


图 6.8　微分调节

时，响应随 F 的变化情况，可见利用 F 值能够抑制超调量。

微分调节一般不单独使用，通常是与比例调节、积分调节(I 调节)等组合构成 PD 调节、PID 调节而应用。

积分调节 比例调节的灵敏度若非无穷大就一定会残留稳定偏差。因为若控制偏差为 0，则操作量也就为 0。为了使稳定偏差为 0，若使比例增益增大会产生不稳定，导致发散。

稳定偏差

积分调节

但是，即使这样很微小的**稳定偏差**，若将其积累起来用偏差的积分值来进行修正操作的就是**积分调节**(integral control action)，简称 I 调节。

PD 调节

PI 调节

PID 调节

I 调节与 P 调节、**PD 调节**组合可构成 **PI 调节**、**PID 调节**供使用。图 6.9 表示 PI 调节的控制示例。

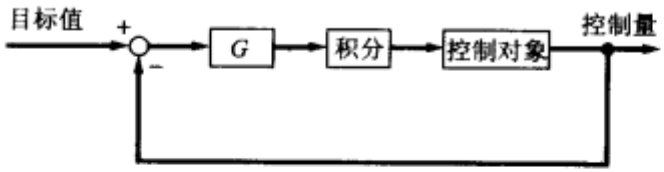


图 6.9 PI 调节的构成

最佳控制调节

在自动控制系统中，当除目标值变化外还存在外界干扰时，为使控制量能与目标值一致，要采用根据反馈信号来修正操作的调节。这种调节有开关调节、P 调节、D 调节、I 调节等，但控制状态必然会有振荡。

最佳控制调节

最佳控制调节是在下列条件下的调节，即应考虑由 P 调节的比例增益和抑制超调量的 D 调节，以及消除稳定偏差的 I 调节来决定的调节。这些条件是：

① 控制量能很快接近目标值。

② 当修正操作产生超调时，能立即返回保持稳定。

③ 没有稳定偏差。

3　传递函数与方框图

要　点

传递函数是控制系统的输入信号与输出信号关系的数学表达式，通常采用拉普拉斯变换的参数 s 来表示。

当输入信号为正弦波时，输出信号也为正弦波，这时传递函数中可将 $s \rightarrow j\omega$ 来表示，称为频率传递函数（参见图 6.10）。

将传递函数写入方框中，并用箭头表示传递的方向，这样的图称为方框图。



图 6.10　传递函数与频率传递函数

解　释

传递函数的求法

如图 6.11 所示，RC 电路传递函数的求法可按下列步骤进行。

(1) 用拉普拉斯变换法来求

① 建立关于输入、输出的微分方程式：

$$Ri(t)+\frac{1}{C}\int i(t)\mathrm{d}t = U_i(t)$$

$$\frac{1}{C}\int i(t)\mathrm{d}t = U_o(t)$$

② 进行拉普拉斯变换。即令

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \rightarrow s \qquad \int \mathrm{d}t \rightarrow \frac{1}{s}$$

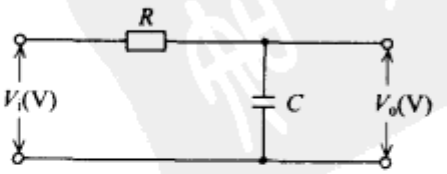


图 6.11　RC 电路

因而有

$$RI(s)+\frac{1}{Cs}I(s)=V_i(s)$$

$$\frac{1}{Cs}I(s)=V_o(s)$$

③ 进行代数运算，求出传递函数：

$$G(s)=\frac{V_o(s)}{V_i(s)}=\frac{\frac{1}{Cs}}{R+\frac{1}{Cs}}$$

$$=\frac{1}{1+sRC}$$

④ 频率传递函数可令 $s\to j\omega$ 而后求得：

$$G(j\omega)=\frac{1}{1+j\omega RC}$$

(2) 用交流电路计算法来求

① 进行交流电路的计算：

$$\dot{V}_o=\frac{1}{j\omega C}I=\frac{1}{j\omega C}\cdot\frac{\dot{V}_i}{R+\frac{1}{j\omega C}}=\frac{\dot{V}_i}{1+j\omega RC}$$

② 求频率传递函数：

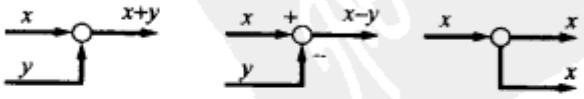
$$G(j\omega)=\frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}=\frac{1}{1+j\omega RC}$$

③ 令 $j\omega\to s$ 求传递函数：

$$G(s)=\frac{1}{1+sRC}$$

方框图

在方框图中，信号的相加、相减、分流的表示如图 6.12 所示。图 6.13 表示方框图的等效变换。利用这种变换关系，可将复杂的组合控制系统的方框图，变换为由简单形式



(a) 相加　(b) 相减　(c) 分流

图 6.12　信号的表示

组合而成的方框图。

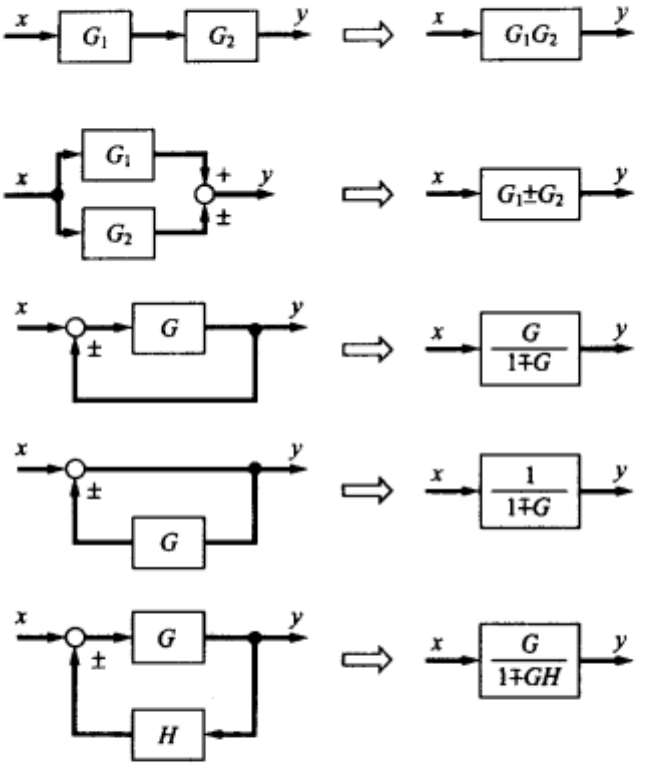


图 6.13　方框图的等效变换

例　题

[1] 对图 6.14 所示的方框图进行等效变换，求传递函数。

答　参见图 6.13，将 G_2、G_3 等效变换，如图 6.15 所示。

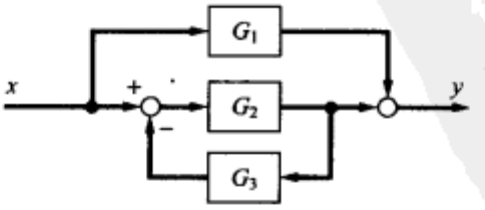


图 6.14　方框图的等效变换

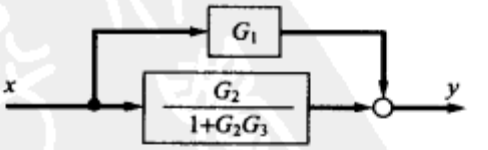


图 6.15　G_2、G_3 的等效变换

再将其进一步变换成一个方框图，如图 6.16 所示。

[2] 对图 6.17 所示方框图进行等效变换，求传递函数。

答　参见图 6.13 进行等效变换，如图 6.18 所示。

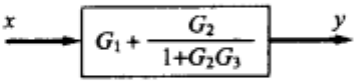


图 6.16 传递函数

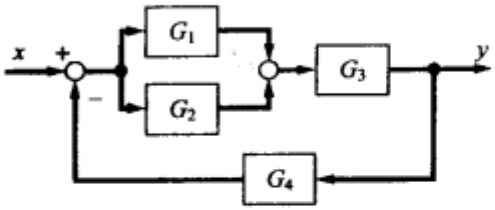


图 6.17 方框图的等效变换

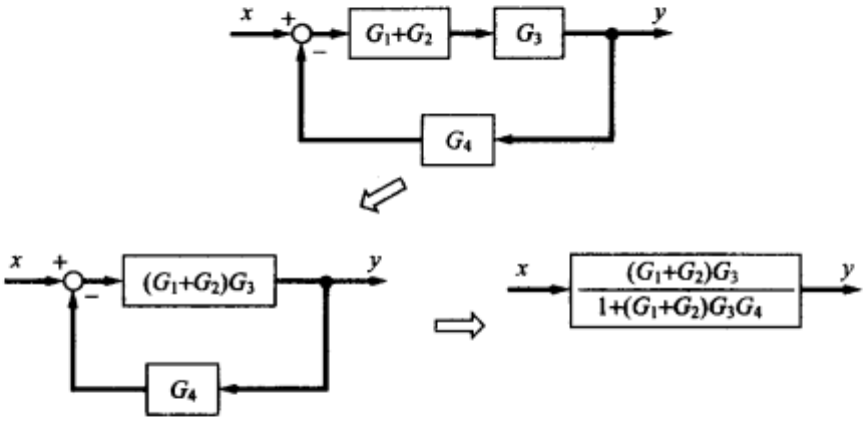


图 6.18 等效变换

4　控制系统的特性

要　点

当控制量的目标值变化时或是有外界干扰时，表示控制量随时间如何变化的特性称为响应。

控制系统的特性可用阶跃响应与频率响应来衡量，并用奈奎斯特线图和波特图来判断稳定性。

解　释

阶跃响应

阶跃响应

向控制系统输入阶跃信号的时候产生的响应，称为**阶跃响应**（参见图 6.19）。相对于输入信号（目标值）的变化，输出信号（控制量）的响应在时间上滞后，其滞后的情况有一次滞后和二次滞后。一次滞后时，传递函数的分母为 s 的一次方式子；二次滞后时，传递函数的分母为 s 的二次方式子。即

$$\text{一次滞后：}\frac{K}{1+Ts}$$

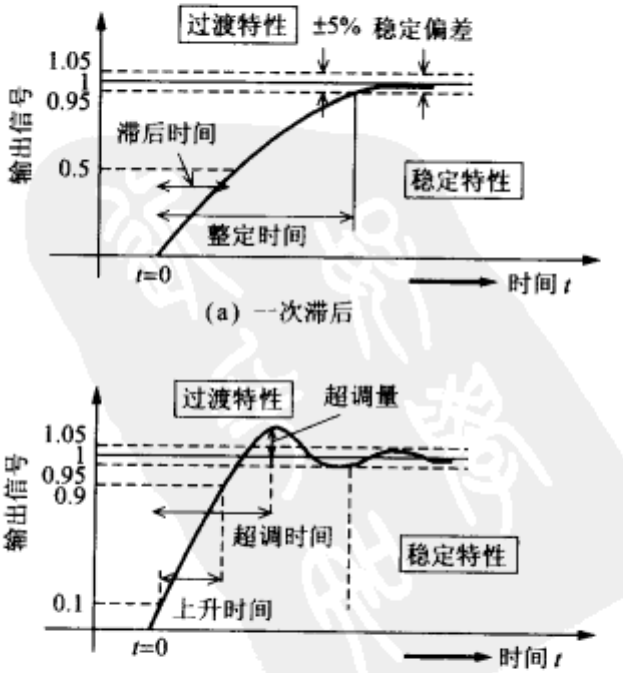


图 6.19　阶跃响应

二次滞后：$\dfrac{K}{as^2+bs+c}$

式中，K、T、a、b、c 均为常数。

频率响应

频率响应

向控制系统中输入正弦波信号时产生的响应称为**频率响应**。频率响应的稳定状态如图 6.20 所示，输出信号相对输入信号产生相位滞后。如果这种频率变化，则输入、输出的振幅比和相位比也发生变化。

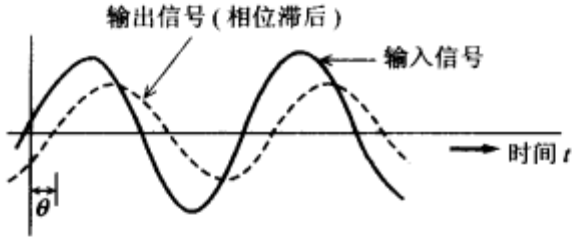


图 6.20　频率响应

波特图

若以横轴表示角频率 ω 的对数刻度，以纵轴表示增益(dB)和相位角(°)的等分刻度，则画出的曲线称为**波特图**。图 6.21 所示为一次滞后和二次滞后的特性，可见随 ω 增加增益减小。而相位角则是一次滞后时接近 −90°，二次滞后时接近 −180°。

这里，增益是以 $20\lg|A_o/A_i|$ 来表示。

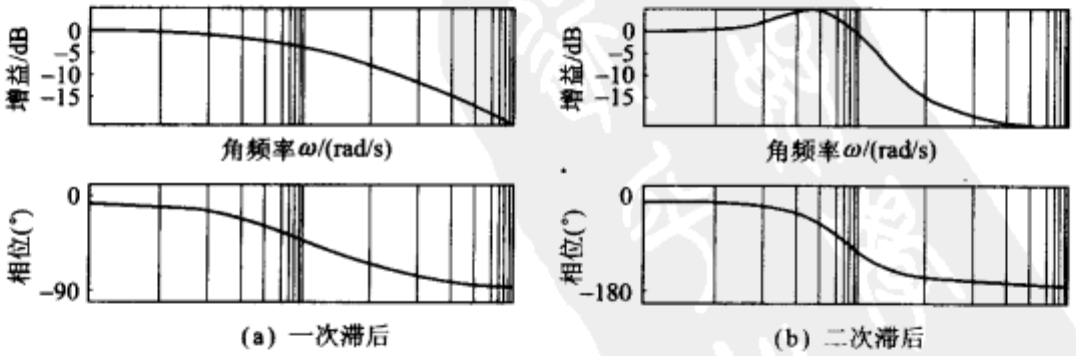
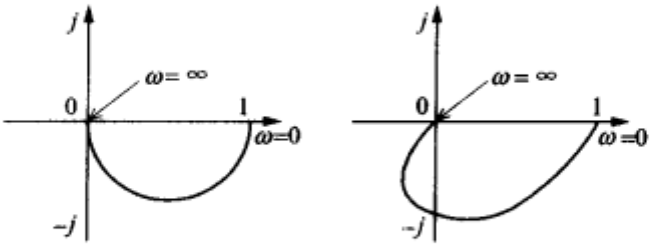


图 6.21　波特图

由于频率传递函数 $G(j\omega)$ 是用复数表示的，故可在复数平面上用矢量轨迹来表示。

图 6.22 表示在频率传递函数中，当角频率 ω 为 0～∞时

的矢量轨迹。



(a) 一次滞后　　(b) 二次滞后

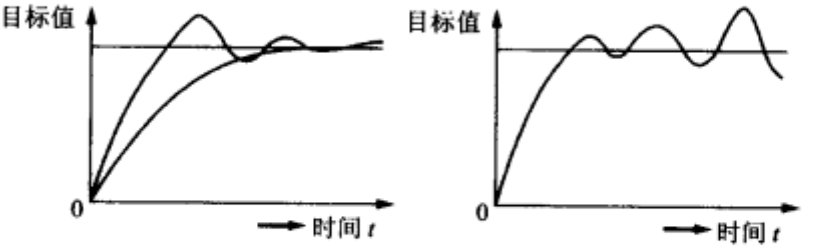
图 6.22　矢量轨迹

稳定性的判别

在反馈控制中当控制量偏离目标值时，就会进行控制，以使控制量与目标值一致。如果响应能随时间而减小，则此控制系统是**稳定**的；反之，若响应随着时间而增大，则此控制系统为**不稳定**(参见图 6.23)。

稳定

不稳定



(a) 稳定　　(b) 不稳定

图 6.23　阶跃响应的稳定性

判断控制系统的稳定和不稳定有下列方法。

(1) 利用奈奎斯特图的方法



图 6.24　反馈控制系统

根据图 6.13 所示，可求出图 6.24 所示的控制系统的传递函数如下：

传递函数：$\dfrac{G(s)}{1+G(s)H(s)}$

闭环传递函数

开环传递函数

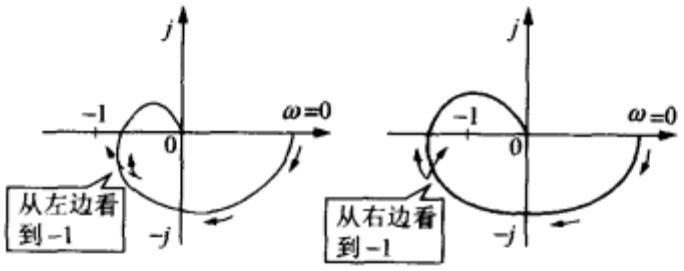
奈奎斯特图

这是**闭环传递函数**，将控制系统中的反馈开环后的 $G(s)H(s)$ 称为**开环传递函数**。此开环传递函数的矢量图称为**奈奎斯特图**，可用它来判别控制系统的稳定与不稳定。

图 6.25 表示控制系统的奈奎斯特图，随着矢量在$\omega=0$时，由实轴的正方向开始向负方向旋转，增益变为 0 终止于原点。如果沿着矢量轨迹的前进方向，能从左边看到$(-1,0)$点，则系统就是稳定的；反之，若从右边看到该点，则为不稳定。

(2) 利用波特图的方法

利用控制系统的开环传递函数的波特图，也能判别稳定和不稳定。



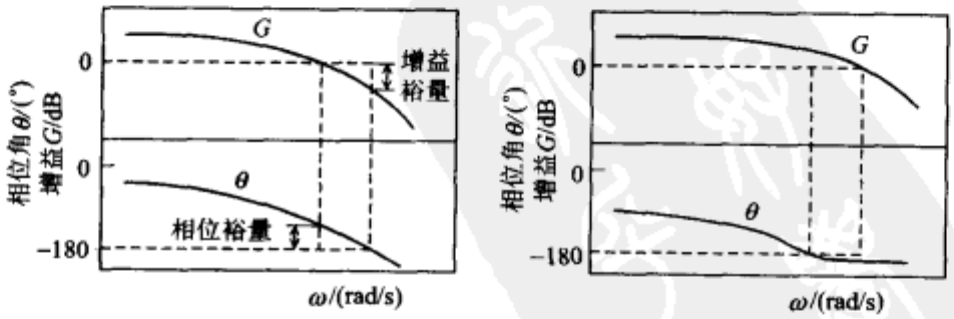
(a) 稳定　　(b) 不稳定

图 6.25　利用奈奎斯特图判别稳定性

图 6.26 表示这种波特图，当相位角为$-180°$时，反馈回路中会产生正反馈。因此，在增益为 0dB 或大于 0 时会产生振荡，只有在为负时才稳定。表示此时对于 0dB 有多大裕量的值，称为**增益裕量**。此外当 0dB 时，相位角由$-180°$趋向 0° 为稳定条件，相对于这时的$-180°$的裕量称为**相位裕量**。

增益裕量

相位裕量



(a) 稳定　　(b) 不稳定

图 6.26　利用波特图判别稳定性

虽然增益裕量、相位裕量增加可使控制系统的稳定性增大，但若上述裕量过分增大，又会造成响应速度变慢，故应取其在适当范围。

5　伺服机构与过程控制

要　点

伺服机构在飞机或船舶的操舵装置、数控机床或机器人控制等方面有广泛的应用。这种控制是将物体的位置、方向、姿势等作为控制量，跟踪目标的变化，从而成为跟踪控制。

过程控制是以煤气或电业为首，在石油工业、化学工业、造纸、制铁等产业领域中对生产处理过程的控制。

这种控制一般是以温度、流量、压力、湿度、液位等为控制对象，保持实现某种目的的条件而进行的控制，因此以不受外界干扰影响，能保持目标值为一定的定值控制为主要着眼点。

解　释

伺服机构的作用

图 6.27 表示电气式伺服机构的示例。左端的手柄转角 θ_1 为目标值，右端的机器人手臂转角 θ_2 为控制量。当电位计 P_1、P_2 的转角相等时，电位差（偏差）为 0，故伺服机构不旋转。今若转动手柄仅使电位计 P_1 转过 θ_1 角度，就会产生与电位计 P_2 之间的转角差成正比的电位差。此电位差由放大器放大后送入伺服电动机，带动机器人的手臂按与目标值 θ_1 成正比的转角 θ_2 而转动。

这种伺服机构对于目标值的变化，能够跟踪控制量进行跟踪控制。

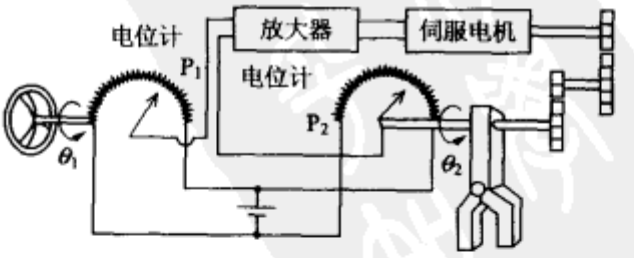


图 6.27　电气式伺服机构示例

伺服机构的构成

图 6.28 所示为伺服机构的方框图。从整体构成看，与

反馈控制系统的一般方框图相同，由控制部分的控制器、操作部分的执行机构及检测部分的传感器构成。

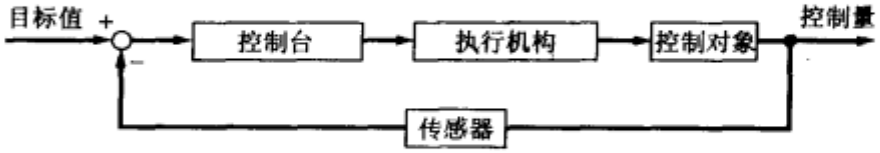


图 6.28　伺服机构的方框图

控制器

控制器的作用是以控制偏差等于 0 为目标向执行机构输送必要的信号，是输出与偏差信号成正比的控制信号的放大器。希望伺服机构能对目标值响应迅速，其定量的表示方法

衰减率

可采用图 6.29 所示的**衰减率**。这种控制动作是在 P 调节的基础上附加了利用图 6.30 所示的反馈补偿的 D 调节的控制。

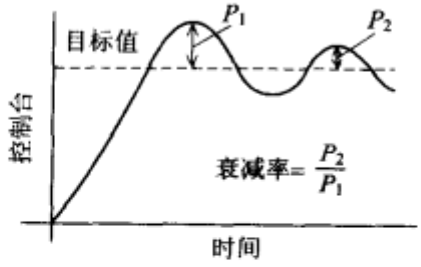


图 6.29　衰减率

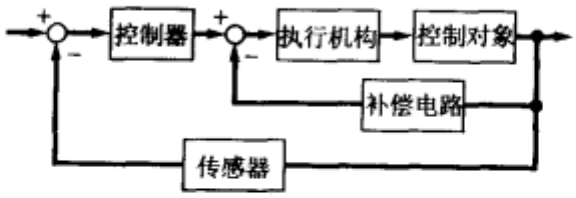


图 6.30　反馈补偿控制

执行机构

执行机构是为得到机械动力机器的总称，其种类如图 6.31 所示。伺服电机中有直流电动机、交流电动机，但现在以安全、可靠、易于维护的交流伺服电动机为主要对象。

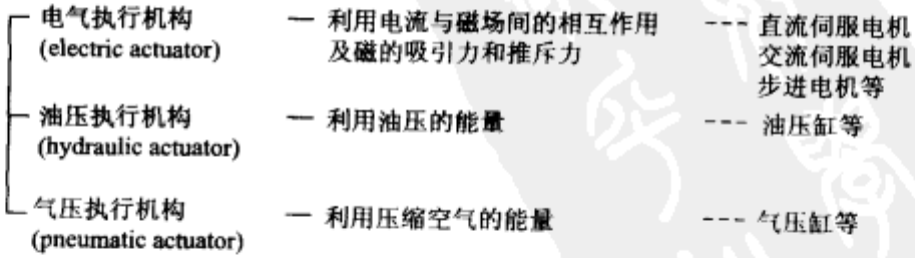


图 6.31　执行机构的种类

旋转编码器

在伺服电机的传感器中，除了图 6.27 中表示过的电位计之外，还有能检测出位置或速度的**旋转编码器**。它如图 6.32 所示，由带有许多缝隙的转盘和检测用的固定圆盘装配到一起构成。透过圆盘和固定圆盘的光，使光电二极管

等受光器件受光并变换成 A 相、B 相电气信号。由于 A 相、B 相两个受光器件的位置关系，会产生 90°的相位差，根据相位差的超前或滞后能够判别正转或反转。此外，根据每相产生的脉冲数，可以求出电动机的旋转变位和角速度。

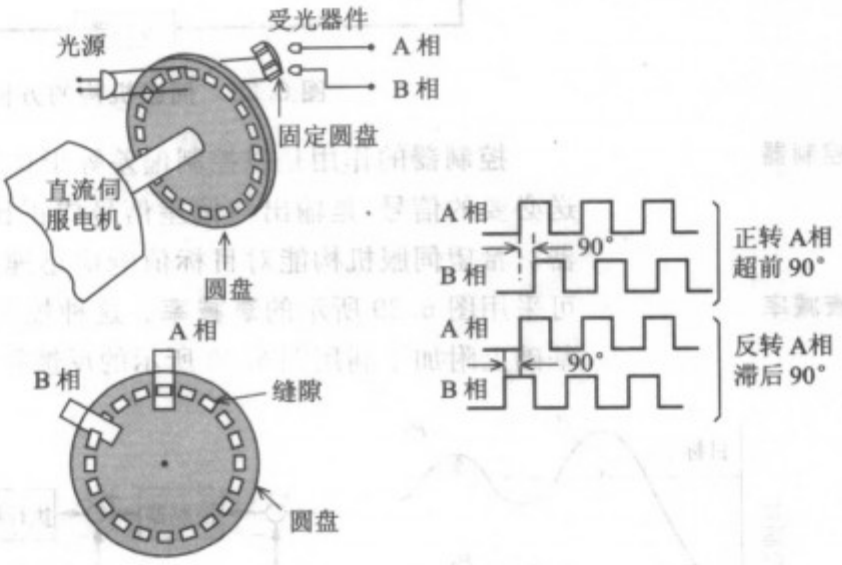


图 6.32　旋转编码器的结构

过程控制

过程控制中作为控制量的对象是温度、压力、流量、液位等，操作这些量可以控制生产处理过程。这是因为化学工业等行业中检测产品的纯度、浓度以及组成成分时，符合要求的传感器比较少。因此，在化学工业、石油工业等行业中，即使所采用的物质或装置不同，与其有关的控制量也限于温度、压力等。

图 6.33 表示已装入水的储罐用蒸汽加热的温度控制示

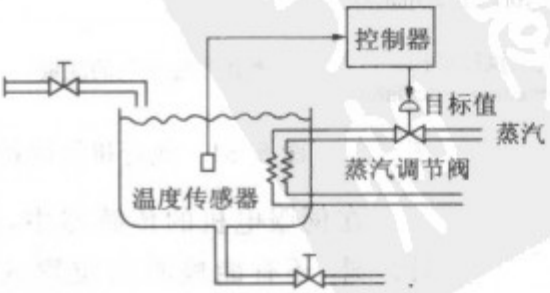


图 6.33　温度控制示例

例。由温度传感器测量储罐内的液体温度，将其传送到控制器。而控制器则将设定的目标值与测定值进行比较，并操作蒸汽调节阀以使其偏差为零。

这样的过程控制系统的反应比伺服系统远为滞后，图6.34表示产生的无效时间。此外，为了确保产品的稳定，实行目标值一定的定值控制。因此，将目标值称为设定值。设定值在较长时间内保持一定，即使变化通常也是缓慢进行的。

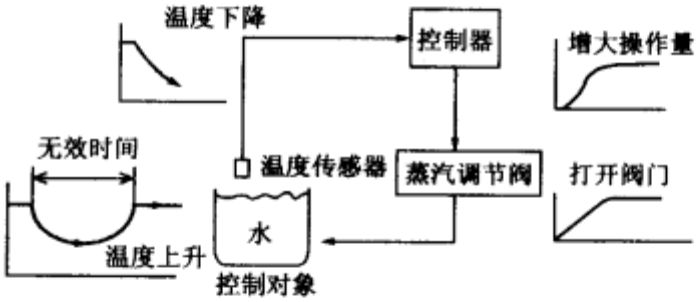


图6.34 控制系统的无效时间

过程控制的构成与图6.28所示相同。使用控制器的标准产品较多，现在成品控制器有电子式和空气式。在控制器中采用的控制操作，大多为PID调节，但也可将D调节、I调节分开变为PI、PD、P的各种调节使用。电子式控制器又分为模拟式和数字式两种，现在主要使用数子式的。

由于控制对象大部分为流体(气体、液体、蒸汽)的流量，故执行机构主要是通过阀门来改变流体管道的阻力，从而实行控制。再有，在温度控制中，除了要操作燃料、蒸汽、热水等物质的流量以外，在操作供给电热器的电流时，还要使用晶闸管或继电器。

传感器由于受上述控制量的种类所限，不需过多的种类，对于控制量主要采用温度传感器、压力传感器等。

6　顺序控制

要　点

顺序控制是由输入指示、作业指令的操作者，电动机或阀门等控制对象，以及控制它们的控制装置（指令处理部分、操作部分、检测部分、显示警报部分）构成。

解　释

顺序控制

顺序控制（sequential control），按照 JIS C 0401 的规定，定义为“按照事先规定的程序，依次实施对控制的各个阶段的控制”，即按照一定的步骤，对机器或装置进行控制。

顺序控制的构成与控制装置

如图 6.35 所示，顺序控制由操作者下达作业指令、指示的指令部分；分析、处理指令内容，发出控制指令的指令处理部分；接受控制指令、使控制对象工作的操作部分；检测控制对象的状态，并反馈到指令处理部分的检测部分；向操作人员报告工作情况的显示、警报部分等构成。

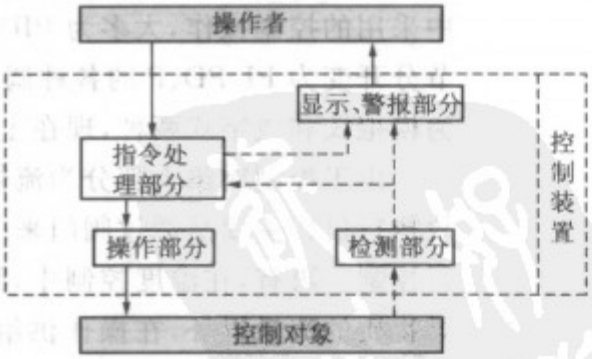


图 6.35　顺序控制的构成

顺序控制的分类

（1）继电器（有触点）顺序控制

即由电磁继电器等具有机械触点的控制电器构成的顺序控制。继电器顺序控制的特点如表 6.1 所示。

电磁继电器

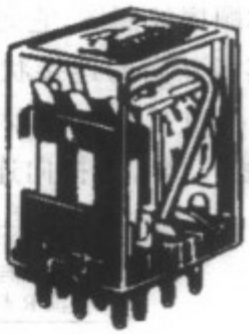
电磁继电器，当有电流在其线圈中流动时，固定铁心就变成了电磁铁，吸引可动铁片，受其连动使动触点打开、闭合。

枢轴型电磁继电器

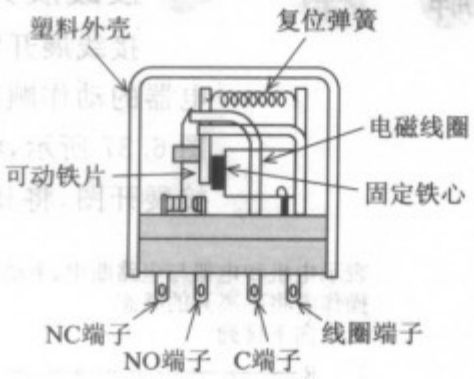
枢轴型电磁继电器的外观与触点结构如图 6.36 所示。

表 6.1 继电器顺序控制的特点

优 点	缺 点
1. 能够接通、断开的负载容量大	1. 耗费电能较大
2. 具有高绝缘电阻，耐高压	2. 机械寿命受动作频繁程度影响
3. 受环境变化影响的温度特性良好	3. 由于振动、冲击可能产生误动作
4. 确认工作状态容易	4. 与无触点的相比，动作速度较慢



(a) 外观



(b) 构造

图 6.36 枢轴型电磁继电器示例

(2) 无触点顺序控制

由使用二极管、晶体管、IC(集成电路)等半导体器件的无触点继电器构成的顺序控制。无触点顺序控制的特点如表 6.2 所示。

表 6.2 无触点顺序控制的特点

优 点	缺 点
1. 动作速度快	1. 抗电气干扰、冲击的能力差
2. 具有高性能，并可小型化	2. 抗环境温度变化影响的能力差
3. 没有因振动、冲击产生的误动作	3. 需要稳定的直流电源
4. 因可动部分无触点，故能频繁使用，寿命长	4. 易受电压变动的影响

7　继电器顺序控制

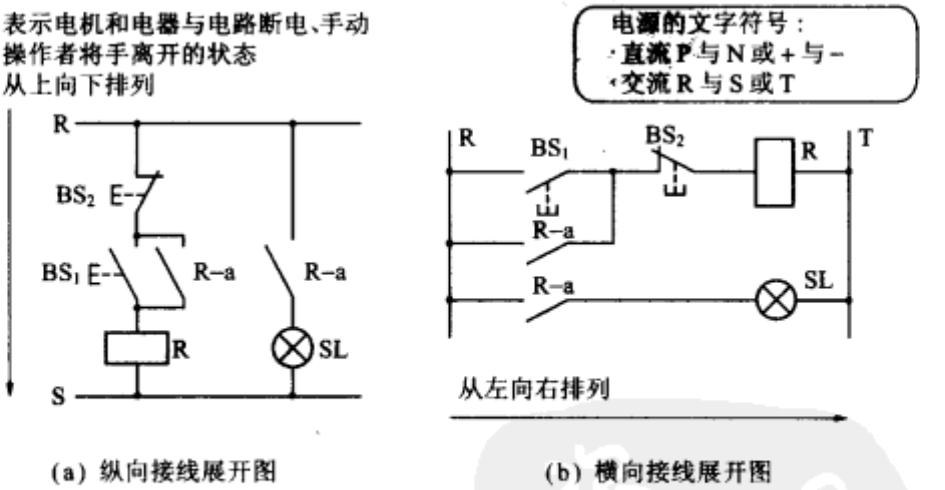
要　点

表示顺序控制的构成或动作关系，要利用接线展开图和时序图。

解　释

接线展开图

接线展开图又称顺序控制图，它是为便于理解各种电机电器的动作顺序及其相互间的连接状态的一种接线图。如图 6.37 所示，将触点与电机和电器以纵线连接者为纵向连接展开图，将其以横线连接者为横向连接展开图。



(a) 纵向接线展开图　　(b) 横向接线展开图

图 6.37　接线展开图

时序图

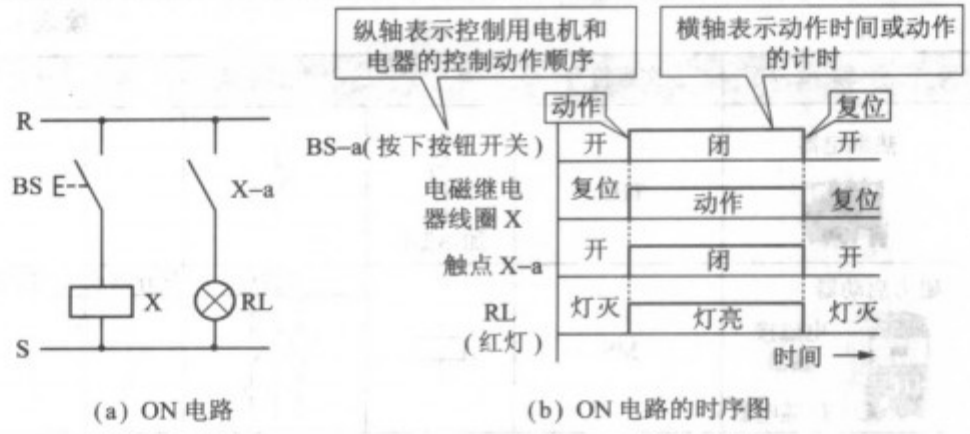
时序图

如图 6.38 所示，**时序图**就是把控制电机和电器的动作关系，与其经过的时间过程一起用图形化加以表达的图。

顺序控制图的符号

顺序控制图的符号，采用 JIS C 0617 电气用图符号与 JIS C 0401 顺序控制图符号。此外，也采用 JEM 1090-1964 自动控制器具符号。

顺序控制图使用的基本符号如表 6.3 所示。



(a) ON 电路　　(b) ON 电路的时序图

图 6.38　时序图

表 6.3　基本符号

名称	文字符号	图形符号
接线闭断路器	MCCB	2极　3极
熔断器	F	
指示灯	SL	RD:红　BU:蓝　YE:黄 WH:白　GN:绿 当指定颜色时,要在符号旁注明
按钮开关	BS	常开触点　常闭触点
继电器(电磁继电器)	R	线圈　常开触点　常闭触点
时间继电器	TLR	延时动作　延时复位
电磁接触器	MC	

续表 6.3

名称	文字符号	图形符号			
热继电器 	THR	加热器件			
磁力启动器  电磁接触器 热继电器	MS		主触点	常开触点	常闭触点
电动机 	M	M ~ IM(异步电动机)			

8　继电器顺序控制的基本电路

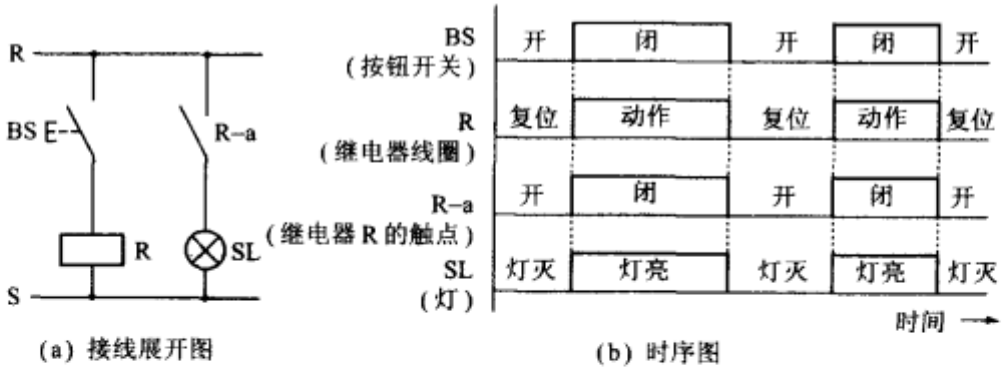
要　点

顺序控制是由若干基本电路组合构成的。基本电路有ON电路、NOT电路、AND电路、OR电路、自保持电路、联锁电路及延时电路等。

解　释

ON电路

如图6.39所示，使用常开触点，只有继电器R的线圈中有电流时该触点才接通使灯亮，这种电路称为ON电路。

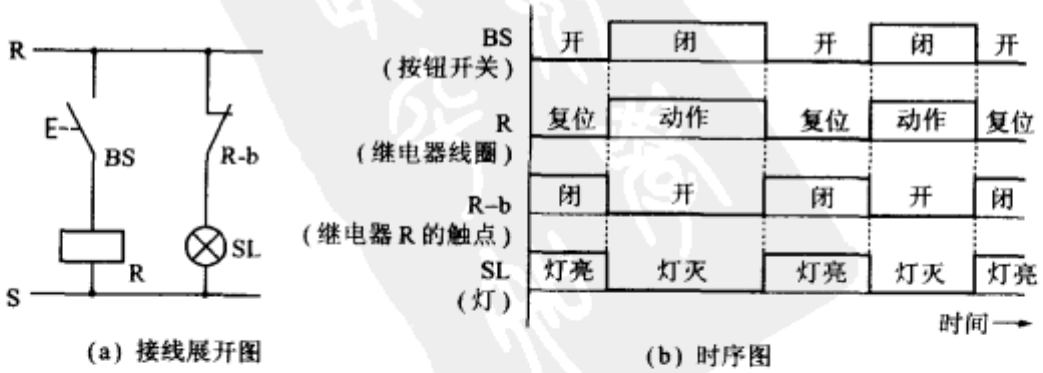


(a) 接线展开图　　(b) 时序图

图6.39　ON电路

NOT电路

如图6.40所示，使用常闭触点，与ON电路相反，只有线圈中有电流时才使灯灭，这种电路称为NOT电路。

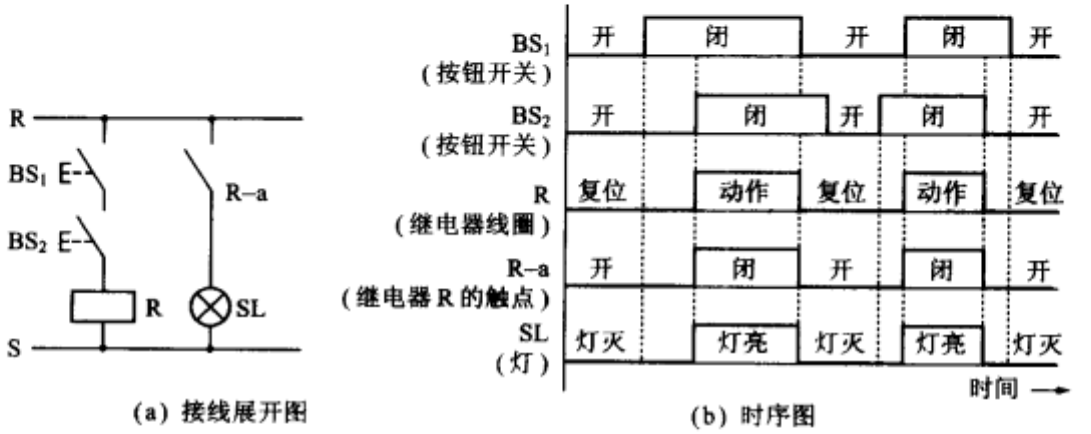


(a) 接线展开图　　(b) 时序图

图6.40　NOT电路

AND 电路

如图 6.41 所示，将常开触点串联连接，只有它们全部接通时才使灯亮，这种电路称为 AND 电路。

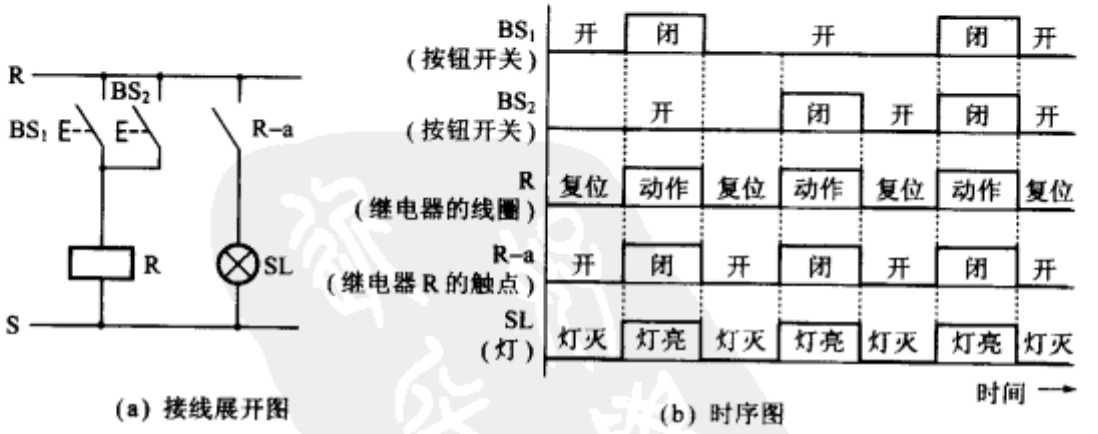


(a) 接线展开图　　(b) 时序图

图 6.41　AND 电路

OR 电路

如图 6.42 所示，将常开触点并联连接，只要其中有一个触点接通，灯就点亮，这种电路称为 OR 电路。



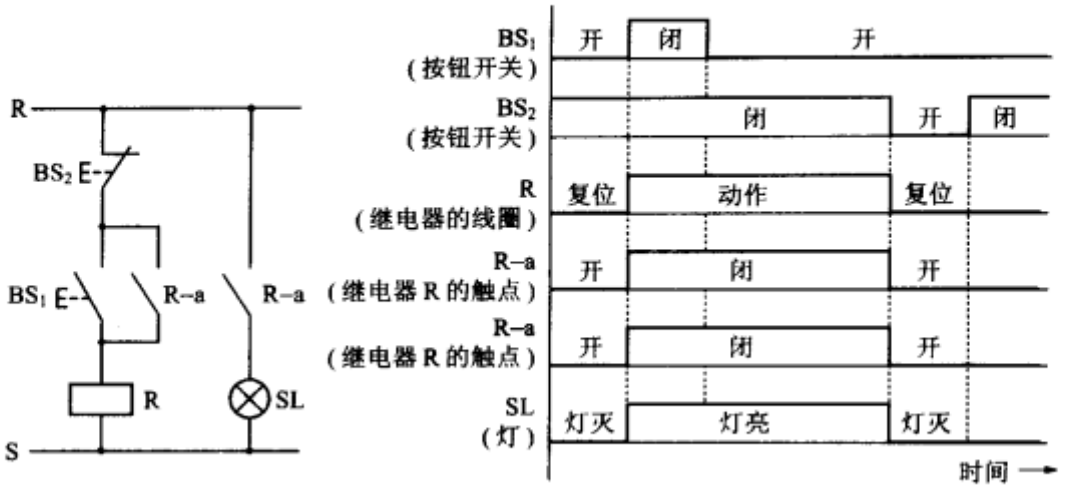
(a) 接线展开图　　(b) 时序图

图 6.42　OR 电路

自保持电路(复位优先)

如图 6.43 所示，利用继电器本身的辅助常开触点，在手指按一下按钮开关，即放开后，使电路仍能继续工作，这种电路称为**自保持电路**。

自保持电路



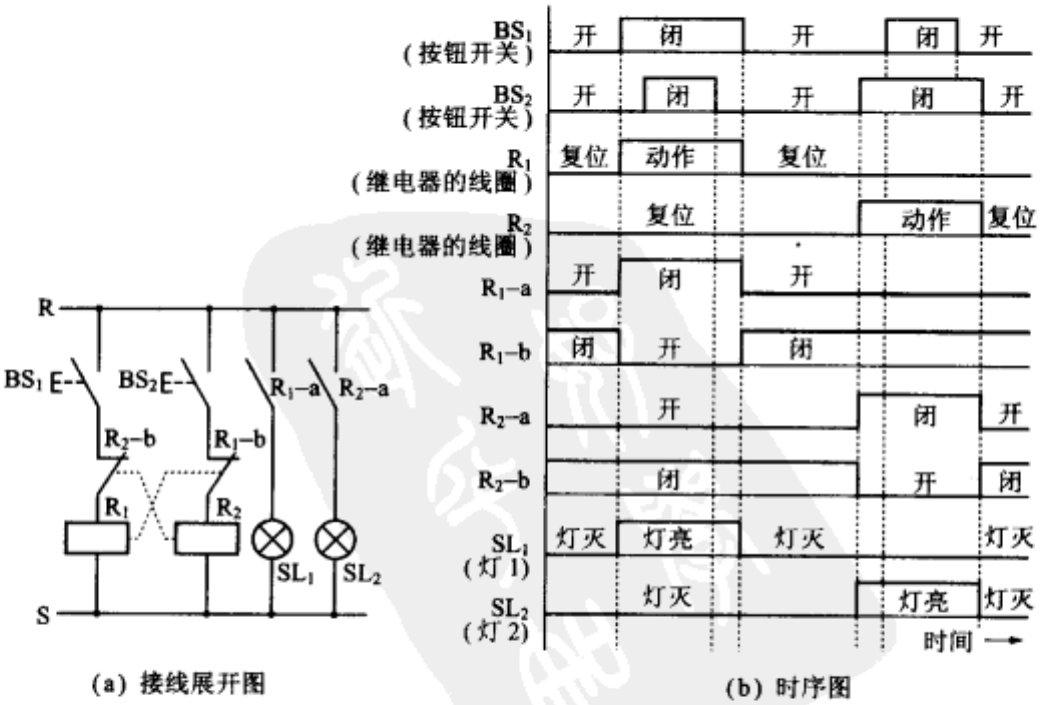
(a) 接线展开图　　(b) 时序图

图 6.43　自保持电路

联锁电路(先动优先)

如图 6.44 所示，当某一电器动作时，由于其中一个常闭触点的作用，使另一电器不能动作，这种电路称为**联锁电路**。

联锁电路



(a) 接线展开图　　(b) 时序图

图 6.44　联锁电路

延时电路(接通延时，断开延时)

(1) 接通延时

在线圈中有电流流通之后，经过延时使触点动作的延时称为接通延时。图 6.45 表示其时序图。

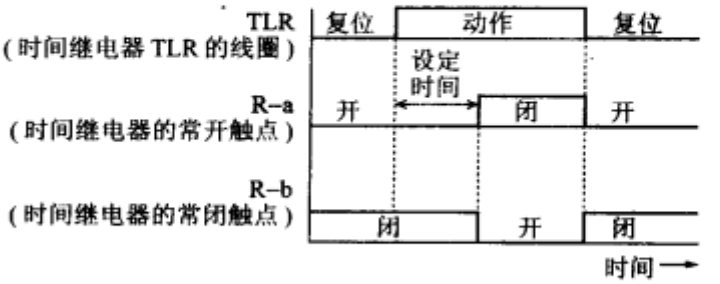


图 6.45　接通延时

(2) 断开延时

在线图中不流通电流之后，经过设定的时间才动作的延时称为断开延时。图 6.46 表示其时序图。

图 6.47 表示利用接通延时的延时工作电路。

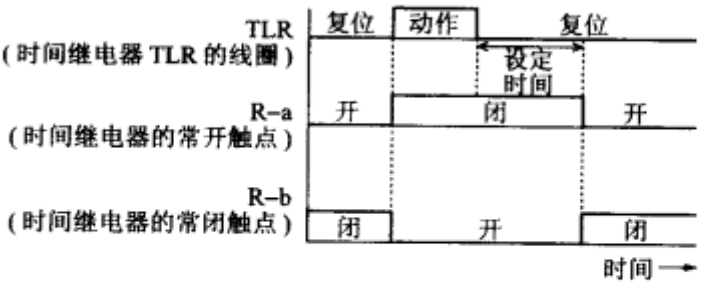


图 6.46　断开延时

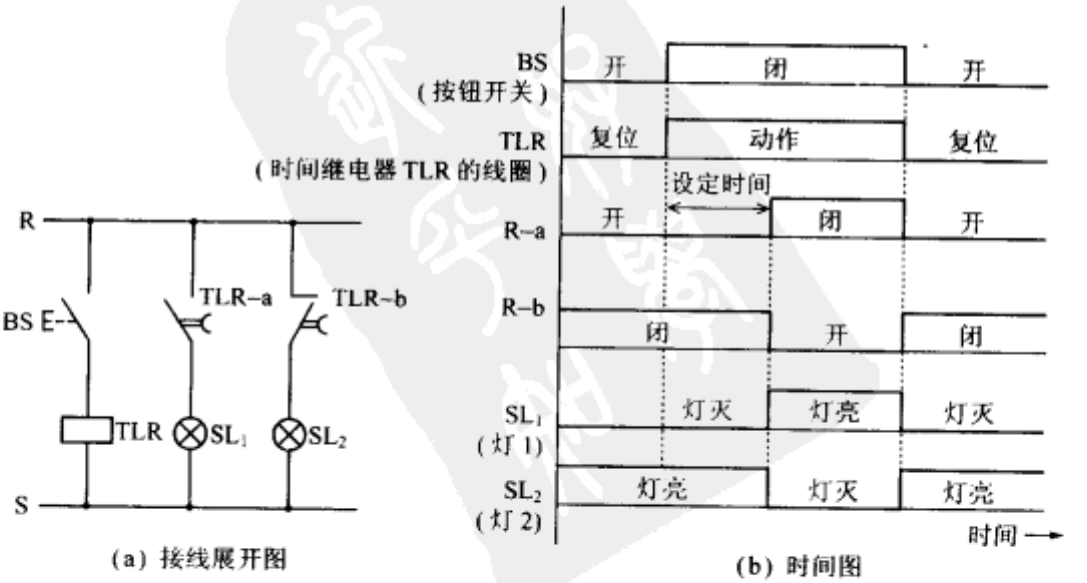


图 6.47　延时电路(接通延时)

9　继电器顺序控制电路的读图

要　点

驱动机器设备用的电动机，多为三相异步电动机。这里就有关绞车、卷帘式铁门等所用电动机的正、反转控制的可逆运行电路，从接线展开图入手来分析其顺序控制电路的工作过程（读图）。

解　释

接线展开图的读图方法

三相异步电动机的可逆运行，采用图 6.48 所示继电器顺序控制电路。当按下正转或反转的启动按钮后，电动机就开始启动。现按顺序按制电路的动作次序予以说明。

启　动

合上接线用断路器 MCCB。

GL（绿灯）亮，表示控制回路接入电源。

正转运行

按下正转用启动按钮 F-ST-BS，正转电磁接触器E-MC的线圈中有电流流动，F-MC 动作。

由于与 F-ST-BS 并联连接有 F-MC-a，此常开触点闭合实行自保持，故手指放开 F-ST-BS 后 F-MC 仍可继续工作。

反转用电磁接触器 R-MC 的线圈因与常闭触点 F-MC-b 串联连接而被断开，从而实现了联锁保护。

在主回路中 F-MC 的主触点闭合，三相异步电动机开始正转运行。

GL 熄灭，R（红）灯亮，表示正转运行。

停　止

按下停止按钮开关 STP-BS。

电磁接触器 F-MC 的线圈中无电流流过，因而复位。

主回路中电磁接触器 F-MC 的主触点打开，三相异步电动机停止运行。

表示正转运行的 RL 熄灭，表示电源接入的 GL 灯亮。

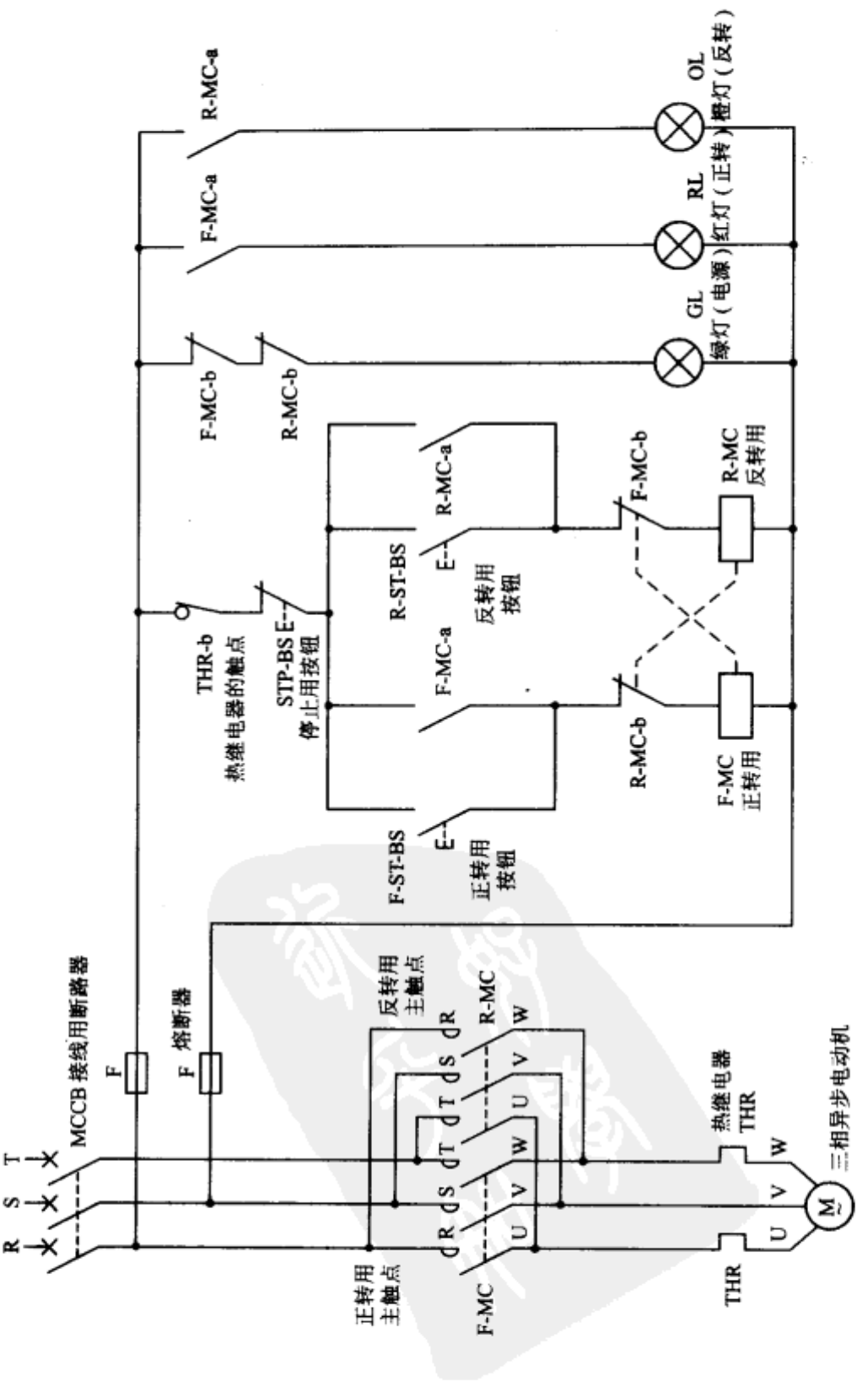


图6.48　三相异步电动机的可逆运行控制电路示例

反转运行

按下反转用启动按钮开关 R-ST-BS，在反转用电磁接触器 R-MC 的线圈中有电流流动，R-MC 动作。

由于与 R-ST-BS 并联连接的常开触点 R-MC-a 闭合，从而实现自保持，即使手指放开 R-ST-BS，电路仍持续工作。

正转用电磁接触器 F-MC 的线圈因与常闭触点R-MC-b串联连接而被断开，实现联锁保护。

在主回路中的主触点 R-MC 闭合，三相异步电动机开始反转运行。

GL 熄灭，OL(橙色)灯亮，表示反转运行。

10　可编程控制器

要　点

可编程控制器(PLC：programmable Logic Controller)，是利用微计算机的顺序控制专用电子控制装置。其优点是没有复杂的接线，能够简便地改变控制内容等。

目前它已取代继电器顺序控制，成为在生产现场不可缺少的控制设备。

解　释

可编程控制器的构成与控制

可编程控制器本身如图 6.49 所示，它是由连接开关或传感器等输入装置的输入部分；连接阀门或电力继电器等输出装置的输出部分；使用微计算机的控制、运算部分；记忆程序和信息的存储记忆部分构成。PLC 能够将传统的继电器、时间继电器、计数器等功能组合运用，仅需做好输入、输出部分的接线即可。

程序使用 PLC 的专用指令用语，利用外部输入装置在记忆部分予以保存。编程之后，就可根据所编程序的控制内容，对输出装置进行控制。

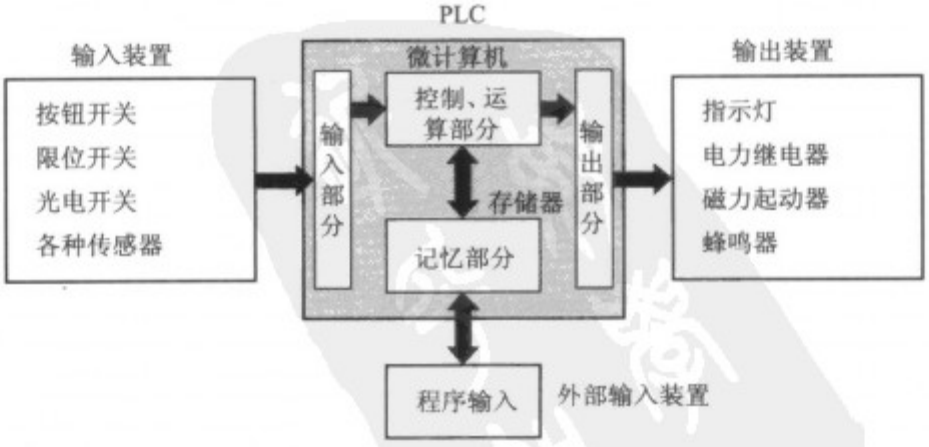


图 6.49　PLC 的构成

梯形图

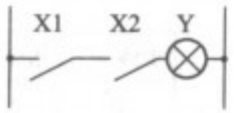
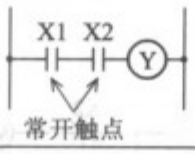
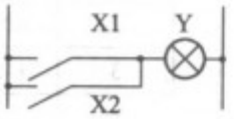
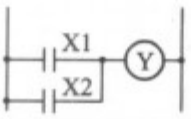
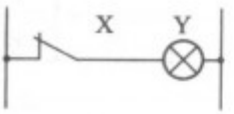
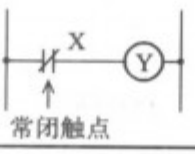
梯形图

在 PLC 中经常使用的接线展开图是**梯形图**(ladder diagram)。梯形图的左右是控制电源的母线，其中间则接以

PLC 内所含触点和输入、输出继电器等器件。触点用继电器的常开触点和常闭触点符号表示。

表 6.4 表示 AND、OR、NOT 基本电路的继电器顺序控制图与 PLC 的梯形图。

表 6.4 顺序控制图与梯形图

电路	顺序控制图	梯形图
AND 电路		
OR 电路		
NOT 电路		

基本指令

PLC 的基本指令

PLC 虽然随机种不同，其指令与功能也不同，但基本的指令内容几乎相同。

表 6.5 表示其例子。

表 6.5 基本指令

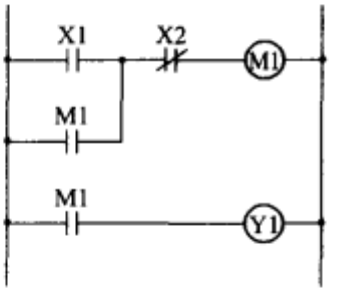
指令用语		内容
M 公司	O 公司	
LD	LD	常开触点与母线连接
LDI	LD・NOT	常闭触点与母线连接
AND	AND	常开触点与其他触点串联
ANI	AND・NOT	常闭触点与其他触点串联
OR	OR	常开触点与其他触点并联
ORI	OR・NOT	常闭触点与其他触点并联
OUT	OUT	输出指令
END	END	程序终了

程序的编制

编制程序可将梯形图(见图 6.50 和图 6.51(a))的触点或器件转换成指令,按图 6.50、图 6.51(b)所示进行。编制好的程序由表示指令顺序号码的**步骤编号**、**指令用语**、**器件编号**构成。

步骤编号
指令用语
器件编号

图 6.50、图 6.51 表示自保持电路的梯形图及其编制的程序(用记忆符号表示)。



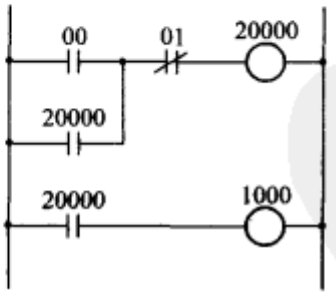
(a)梯形图

步骤编号	指令用语	器件编号
0	LD	X1
1	OR	M1
2	ANDI	X2
3	OUT	M1
4	LD	M1
5	OUT	Y1
6	END	

X1,X2 输入继电器
Y1　输出继电器
M1　内部继电器
(用符号来区别输入/输出继电器、内部继电器)

(b)记忆符

图 6.50　M 公司示例



(a)梯形图

步骤编号	指令用语	器件编号
0	LD	00
1	OR	20000
2	AND NOT	01
3	OUT	20000
4	LD	20000
5	OUT	1000
6	END	

00,01　输入继电器
1000　输出继电器
20000　内部继电器
(用编号来区别输入/输出继电器、内部继电器)

(b)记忆符

图 6.51　() 公司示例

PLC 的器件

PLC 内含输入继电器、输出继电器、内部继电器、定时器、计数器等,可利用编程方便地构成复杂的电路。

表 6.6 表示小型 PLC 的各元件数的示例。

表 6.6 各元件数示例

器 件	点 数	备 注
输入继电器	32	随机种而异
输出继电器	32	
辅助继电器	1024	—
定时器	256	0.01～3276s
计数器	241	计数为 1～32767

PLC 的开发背景

在 1968 年 GM 公司的产业用各种控制装置的样机说明书中已经明确地记载了必须具备的条件，表明了 PLC 开发的背景。

＜GM 公司说明书提示的部分内容＞

① 程序容易变更，即使在现场也能改变。

② 维护检修容易。

③ 利用继电器控制盘，可靠性高。

④ 可将中央数据收集系统的输出数据送出。

⑤ 具有最低 4K 可扩张编程的存储器。

PLC 的特点

PLC 是为克服继电器顺序控制的各种缺点而开发出来的，与继电器顺序控制相比，它具有下列特点：

① 设计容易，程序更改简单。

② 没有复杂的接线，结构紧凑。

③ 内含多个定时器及内部继电器，比较经济。

④ 核心部分为半导体，可靠性高。

⑤ 维护管理容易。

⑥ 利用编程能够实现所有复杂的控制。

PLC 的应用

由于 PLC 与继电器顺序控制相比有许多优点，故在中、小企业的生产系统、工业机器人和大规模的工厂自动化中均大量使用。此外，因其还具备数据处理等功能，故应用范围广。例如，PLC 有下列应用：

① 装配工厂的搬运设备的控制。

② 立体停车场的控制。

③ 报纸印刷线的控制。

④ 化学工厂的粉体、液体的称量控制。

⑤ 仓库的库存和出入库管理的控制。

11　可编程控制器的国际标准

要　点

作为可编程控制器(PLC：Programmable Logic Controller)的编程语言，在上节介绍了梯形图(LD：Ladder Diagram)。

另一方面，作为国际标准在梯形图之外，还制定了IL(见图6.52)、FBD(见图6.53)、ST及SFC。



图6.52　IL

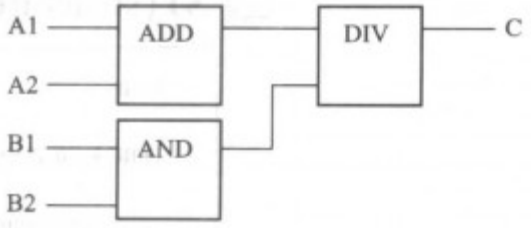


图6.53　FBD

解　释

制定国际标准的目的

为了消除因制造厂家不同而导致的PLC存在的差异，有必要实行其硬件和软件的标准化(见表6.7)。

表6.7　PLC的标准(IEC与JIS标准)

IEC编号	JIS编号	内　容
IEC 61131-1	JIS B 3501	一般信息
IEC 61131-2	JIS B 3502	传给装置的要求事项及试验
IEC 61131-3	JIS B 3503	编程语言

其中有关编程语言的规定如下：

① 与机种无关(不论何厂家，都使用含梯形图的世界通用程序语言)。

② 能够使程序结构化(可分割成小型模块来处理。不使用转移指令，可根据条件分支或反复指令编成程序。程序的开发可以分别承担，使可靠性得以提高)。

③ 能够大规模开发(可分别处理，能由多人同时开发。能够混在一起使用LD、IL、FBD、ST、SFC，并可使用各自满意的编程语言)。

④ 能够实现程序的模块化(可将模块化的部分在其他程序中再用)。

⑤ 进行严格的语法校验(能防止程序错误)。

IEC 是被称为国际电气标准会议(International Electrotechnical Commission)的国际标准化机构,是制定电工与电子技术领域的国际标准的团体名称。JIS(Japaness Industrial Standard 即日本工业标准)是以促进日本工业的标准化为目的、基于工业标准化法所制定的国家标准。

ST(structured text)

```
k:=0;
FOR k:=0 TO 100;
    sum:=sum+k;
END-FOR;
```

仿照 C 语言,用文本形式记述(参见图 6.54)。有 IF 语句(条件分支)或 FOR 语句(反复)等指令。此外,还提供三角函数等多种算术函数。适合处理复杂的计算式。

图 6.54　ST

SFC(Sequential Function Chart)

由步骤、转变、功能、分支等构成,以程序方框图(流程图)记述(参见图 6.55)。转变与功能可用 LD、IL、FBD、ST 语言记述。步骤带有处理与处理的区别,以区分激活状态与非激活状态。在激活状态时,实行连接步骤的功能。在转变中记述条件,若条件成立就移动到下一步骤(也可根据分支选择步骤)。

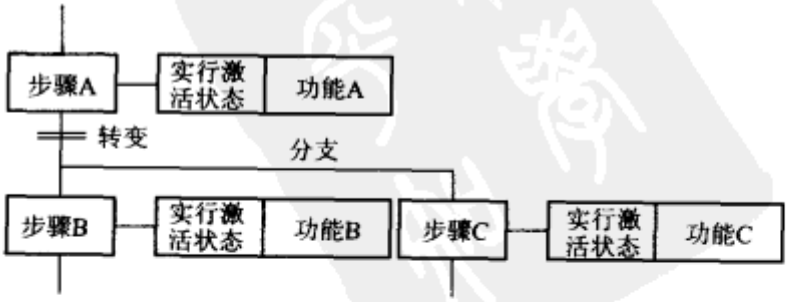


图 6.55　SFC

12　计算机控制

要　点

在图 6.56 所示的反馈控制系统中，由计算机软件实现的虚线围成的部分，称为数字反馈控制。使用计算机，能够实现 PID 控制和其他各种控制方式，只要改变程序就能很容易地实现功能的增补、修正等。

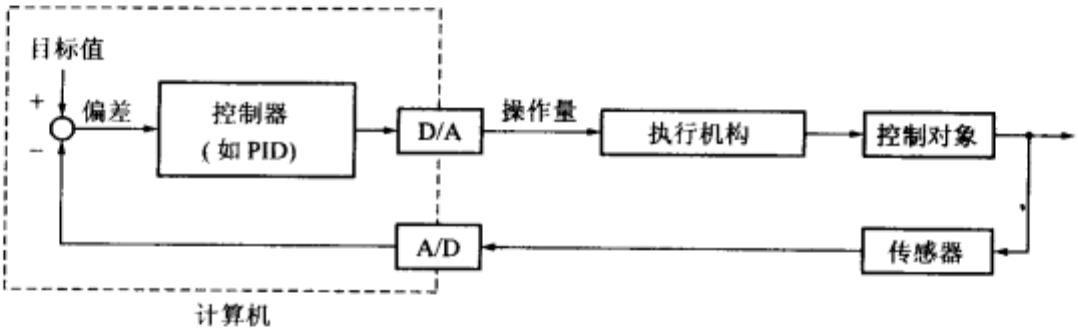


图 6.56　利用计算机的反馈控制

解　释

A/D 变换

人们能够使用专门的传感器以模拟信号（如电压）来测量温度、声音、速度、流量等的变化。另一方面，计算机则能将所有的信号以数字信号（0 与 1）进行处理。因此，计算机需接收由传感器等传来的信号，从而读取某一时间间隔的模拟信号（这称为采样，此时间间隔称为采样间隔）使之成为数字值。这称为 A/D 变换，此电路或装置称为 A/D 变换器（analog to digital converter）。

在微机中作为标准装备的话筒信号，A/D 变换电路就是一例。对于传感器等传来的信号，需往微机中插入使用的 A/D 用增设板，该产品已大量问世。

分辨率与 LSB

A/D 变换的意思是将连续信号变换成不连续的值。例如，若输入电压的范围为 0～1V，现在考虑将其变换成 2bit 的数字值。用 2bit 可表示的值为 00、01、10、11 四个，模拟电压可变成这四个数字值中的任何一个值。一个数字值的范围，就成了将 0～1V 分成 4 份的 0.25V（参见图 6.57）。

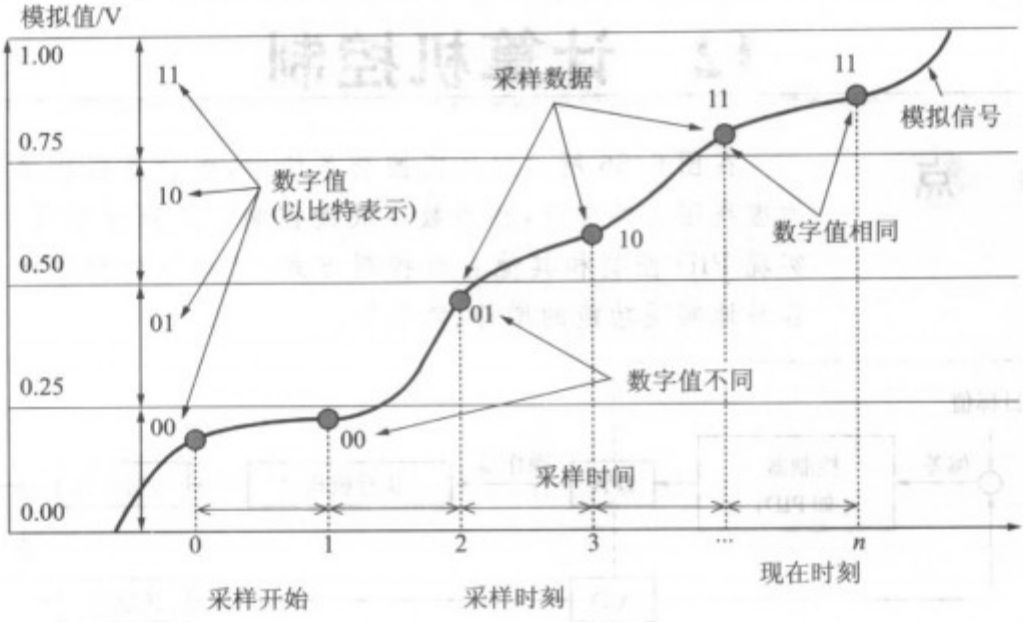


图 6.57　采样与数字值的说明

这种分割模拟输入信号的比特数称为分辨率，1bit 所分的模拟量称为 LSB(Least Significant Bit，最下位比特)。比特数越多，越能确切地提取模拟信号。在微机中所使用的 A/D 板的分辨率为 12 或 16 者居多。

例　题

[1] 考虑一块分辨率为 3bit，输入电压为 0～5V 的 A/D 板。求得的 A/D 变换后的数字值与模拟值的关系见表 6.8。由图 6.57 和表 6.8 可知，即使输入的电压不同，数字值也可能相同。

表 6.8　数字值与输入电压的范围

输入电压的范围/V	比特	数字值(以十进制数表示)	输入电压的范围/V	比特	数字值(以十进制数表示)
0.000～0.625 以下	000	0	2.500～3.125	100	4
0.625～1.250	001	1	3.125～3.750	101	5
1.250～1.875	010	2	3.750～4.375	110	6
1.875～2.500	011	3	4.375～5.000	111	7

[2] 求分辨率为 12bit、输入电压为 −10～+10V 的 A/D 板的 LSB。

答　$$\mathrm{LSB}=\frac{\text{输入电压的范围}}{2^{\text{分辨率比特数}}}=\frac{20}{2^{12}}=0.0048828(\mathrm{V})$$

单端输入与差动输入

单端输入
差动输入

模拟信号的信号线与 A/D 板的连接方法，有**单端输入**和**差动输入**两种形式(参见图 6.58)。单端输入是提取信号线与接地线这两根线之间的信号，以其电压差作为输入电压进行 A/D 变换。差动输入则是要用“+”信号线、“−”信号线和接地线共 3 根线。将“+”与“−”信号线的电压之差作为输入电压进行 A/D 变换。差动输入能减小干扰的影响。

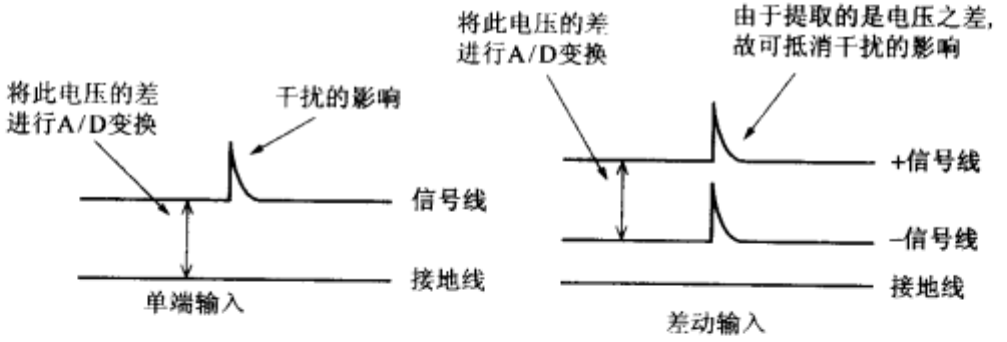


图 6.58 单端输入与差动输入

D/A 变换

把数字值变换成模拟值称作 D/A 变换。其电路或装置称为 D/A 变换器(digital to analog converter)。图 6.56 所示的计算机内是数字值，利用 D/A 变换将操作量变作模拟值，由计算机输出。在微机中作为标准装备的扬声器用输出信号 D/A 变换电路即是一例，与 A/D 板相同 D/A 用的扩展板也已大量上市。

还有在 1 块板上设有 A/D 与 D/A 功能的扩展板。此外，也有 PC 卡型、USB 连接型、简易网络连接型。

数字值实际上输出了多少模拟值可由下式计算：

$$\text{输出的模拟值}=\frac{\text{输出模拟量的范围}\times\text{数字值}}{(\text{数字值的个数}-1)}-|\text{输出模拟量的最小值}| \quad (6.1)$$

式中的输出模拟量的范围与输出模拟量的最小值，如果所用 D/A 板的输出电压为 −5～+5V 时，分别是 10 与 −5；为 0～5V 时，分别是 5 与 0。数字值的个数，由 D/A 板的分

辨率决定。例如，若分辨率为12bit，则由2^{12}可知为4096。

再有，输出的模拟值在下一个输出之前一直保持此值输出，这称为0阶保持。

例 题

[1] 考虑一块分辨率为3bit、输出电压为$-5\sim+5$V的D/A板。根据式(6.1)，将数字值的变换计算结果示于表6.9，进而也表示了变换成0～5V输出电压时的计算结果。

$$\text{输出电压}=\frac{10\times\text{数字值}}{(2^3-1)}-5$$

表6.9 数字值与输出电压

数字值(以十进制数表示)	输出电压(−5+5V)	输出电压(0～5V)	数字值(以十进制数表示)	输出电压(−5+5V)	输出电压(0～5V)
0	−5.000	0.000	4	+0.714	2.857
1	−3.571	0.714	5	+2.143	3.571
2	−2.143	1.429	6	+3.571	4.286
3	−0.714	2.143	7	+5.000	5.000

D/A板的双极输出与单极输出

双极输出

单极输出

电压的输出形式有两种，一种称为**双极输出**，可输出正电压也可输出负电压。另一种为**单极输出**，仅能输出正电压或负电压范围内的电压。

控制方式的程序

PID控制的数字式可用

$$\text{操作量}=\left(\frac{100}{PB}\right)\left[e(n)+\left(\frac{1}{T_I}\right)\sum_{i=0}^{n}e(i)\Delta T+T_D\left(\frac{e(n)-e(n-1)}{\Delta T}\right)\right] \quad (6.2)$$

$$(i=0,1,2,3,\cdots,n)$$

采样间隔

来表达。式中$e(n)$为偏差，ΔT为**采样间隔**，n为现在的采样时刻。并以PB表示比例带，T_I表示积分时间，T_D表示微分时间。

若令传感器的输出为$y(n)$，目标值为S_v，则式中的偏

差为

$$e(n)=S_v-y(n) \tag{6.3}$$

利用 PID 的反馈控制，其程序的流程可简单地表示如下：

① 利用 A/D 变换得到传感器的值 $y(n)$。

② 由式(6.3)求偏差。

③ 由式(6.2)计算 PID 控制的操作量。

④ 利用 D/A 变换向执行机构等输入上述操作量。

从控制开始到停止，反复进行①～④。

数字滤波

数字滤波

上述由①A/D 变换所得到的传感器的测量结果，有时其数字值可能有细小的跳动。其对策之一可用**数字滤波**来解决。这就是将过去的几个数据进行平均。注意不是每隔数个的平均值。数字滤波的个数为 3 个时的情况示于图 6.59。

低通滤波器

除了数字滤波之外，使用**低通滤波器**的场合也很多。

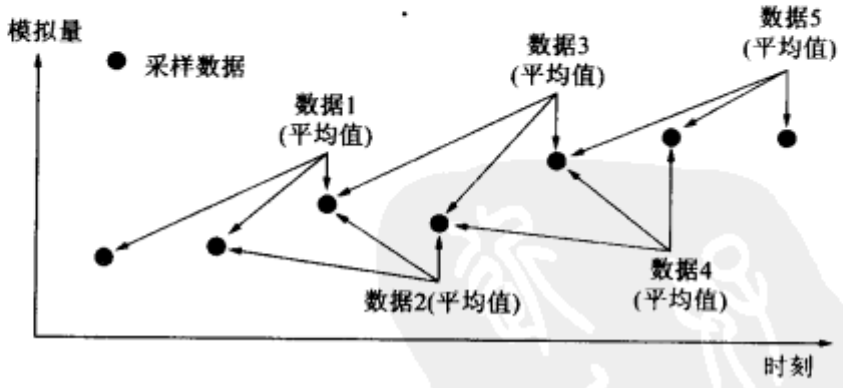


图 6.59 数字滤波(3 个时的情况)

事例介绍：利用微机控制水位

利用微机的水槽水位控制系统如图 6.60 所示。水泵是将水槽 2 中的水抽上来注入水槽 1 的设备。水位传感器，与水压成正比将水位变成电压输出。微机则将此电压进行 A/D 变换并提取，此值相当于式(6.3)的 $y(n)$。将事先确定的目标值 S_v 输入由微机实施的控制程序中，可由式(6.3)求出偏差。进而再由式(6.2)求出操作量。将此结果

进行 D/A 变换再输送到变换器中。变换器则与此电压成正比来改变水泵电动机的转数。

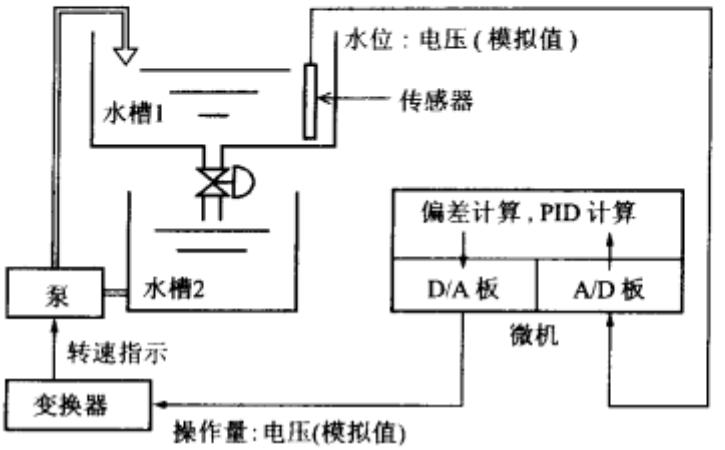


图 6.60　水位控制装置

制造业中控制用的计算机

在小规模工厂中除了 PLC 之外，还使用着比家用或办公室用微机更环保的工业用微机。

在中、大规模的工厂中，使用 DCS（Distributed Control System，分散控制系统）较多。因为在中、大规模的工厂中，有着多个控制场所（有几百到几千个反馈装置）。不是把它们用一台计算机集中控制，而是在现场附近设置 PLC 等小型控制机进行各种控制，由 DCS 承担统辖它们的作用。

使用互联网的远程控制

远程控制

最近，使用互联网的**远程控制**事例很多。例如网络照相机的控制，它是在自宅和远程地方将设置的照相机接到互联网上，使照相机的角度能由微机进行远程控制的系统。通常在家庭或商店的防盗、隔墙监视等场合使用。

除此以外，还有将 2 台机器人连到网络上，使一台机器人（主控）的动作跟随另一台机器人（从动）作模仿动作，而从动侧的反作用力等又返回到主控侧的双向（bilateral）控制系统。在宇宙空间或灾害现场、有原子能设备的场所等人所不能进入的区域，可由从动侧的机器人代替人进行复杂的作业，这是人们所期待的。

第7章

电机与电力电子学

● 责任编委
冈本裕生
● 执　　笔
石井昌幸(1～4)
志贺道男(5～9)
佐野正史(10～15)
仓地　修(16～18)
小幡松二(19～21)
坂部　隆(22～24)



本章学习有关电机与电力电子学的基础知识及基本技术。

直流发电机用在电化学工业等领域，直流电动机用在简单的速度调速领域，感应电动机则作为定速度的电动机使用。随着电力电子学技术的发展，使用逆变器的调速正成为主流。由于发电厂的同步发电机恒速运转，供给人们稳定的三相交流电。本章还学习各种有关的电工材料、电力半导体器件及电力变换技术。

1　什么是直流电机

要　点

在直流电机中，有根据右手定则产生感应电动势的直流发电机和根据左手定则产生电磁力的直流电动机，构造是完全相同的。

从外部施加旋转力并使之产生直流电动势的是直流发电机，从外部供给直流电能使之产生旋转力的是直流电动机。

解　释

什么是直流发电机——感应电动势的产生

由于磁场（磁力线）的作用，将机械能转换为电能的是发电机。其原理示于图 7.1。

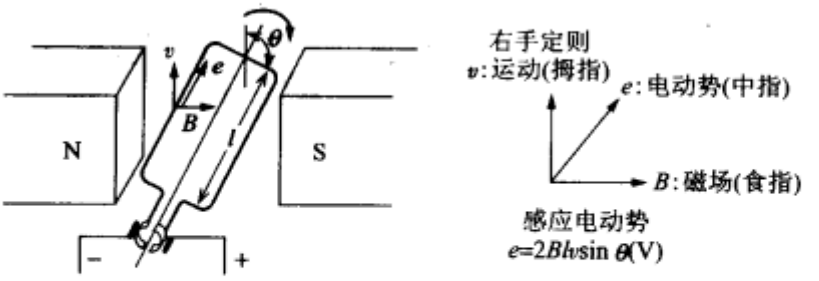


图 7.1　直流发电机的原理

什么是直流电动机——旋转力的产生

由于磁场（磁力线）的作用，将电能转换为机械能的是电动机。其原理示于图 7.2 中。

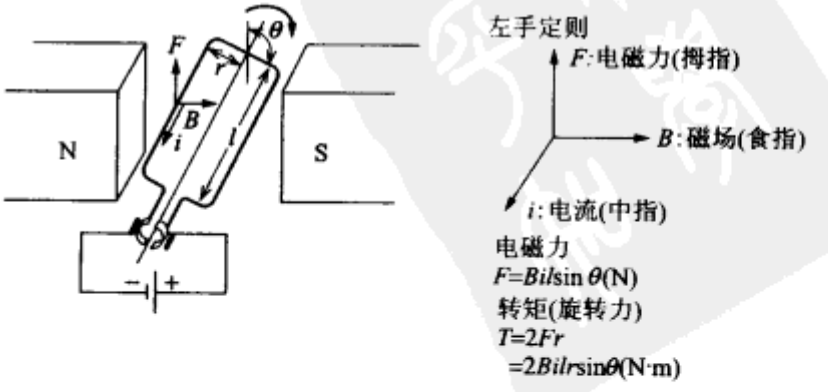


图 7.2　直流电动机的原理

直流电机的构造

直流电机由磁场磁铁、电枢、整流子及电刷组成(见图 7.3)。

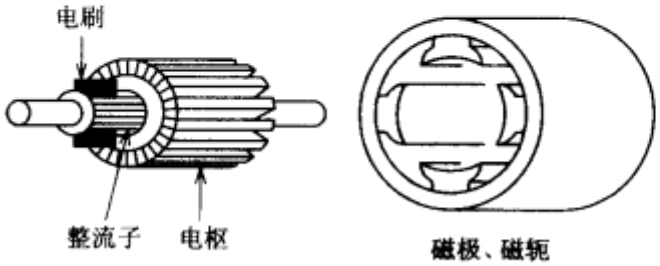


图 7.3 直流电机的构造

场磁铁 为产生电动势或旋转力所必需的发出磁力线的电磁铁部分。

电枢 在铁心(电枢铁心)的槽内嵌入导体(电机绕组),由与导体交链的磁力线的变化而产生电动势或旋转力的部分。

整流子及电刷 整流子的作用是使电动势或旋转力的方向相同,电刷与整流子接触并将电机绕组与外部电路连接。

叠绕与波绕——电枢绕线的方法

叠绕

叠绕也叫并联绕,电刷数和电枢绕组的并联回路数等于磁极数。因此,若增加极数就可以增加电流容量,适合于低电压、大电流的电机。

波绕

波绕也叫串联绕,电刷数和电枢绕组的并联回路数与磁极数无关,总是等于 2。如果增加极数就可以提高感应电动势,适用于高电压的电机(见图 7.4)。

从直流到交流

人们在早期利用摩擦生电(静电)并发明了电池,所以只使用直流电。因此不论是发电机还是电动机,使用直流电的电机就随着构思、发明、改良而发展起来。但随着用电量的增加,扩大了适于远距离、大容量输电的交流电的使用,直流电机的使用领域逐渐受到限制。

特别是近年大功率电子学的进步,交、直流的变换也容

易了，汽车的发电机也用交流，连电气铁道用的直流串励电动机也正由使用 VVVF 变换器的感应电动机所取代。

今后会不会只剩下小型、超小型直流电机呢？

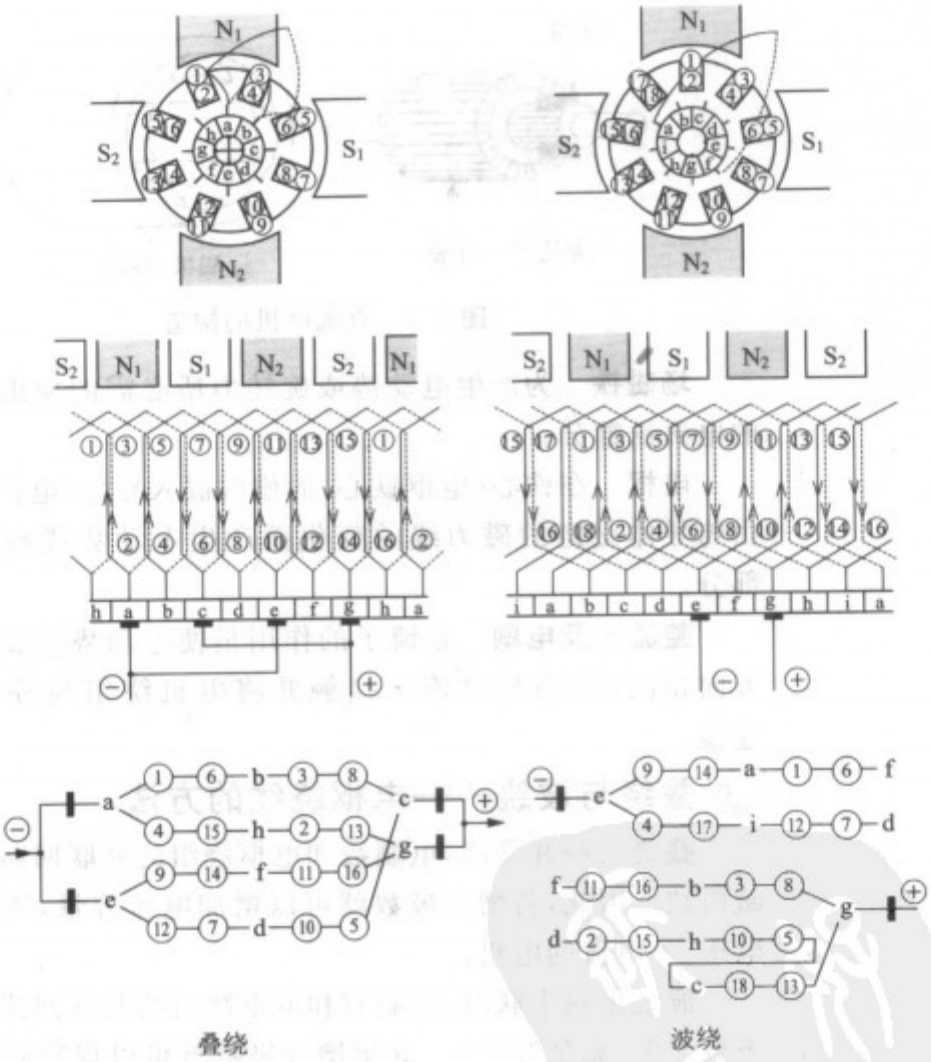


图 7.4　叠绕与波绕

2 直流发电机的种类及特性

要 点

直流发电机的感应电动势与各极的磁通及转速成正比。按照励磁方法不同，分为他励发电机与自励发电机；自励发电机按照电枢绕组和磁场绕组的连接方式的不同，又可分为并励、串励和复励发电机。

解 释

直流发电机的感应电动势

假设在直流发电机中磁极与电枢之间气隙的平均磁通密度是 B(T)，电枢绕组的线速度是 v(m/s)，绕组的有效长度是 l(m)，当导体垂直切割磁力线时每一根导体的感应电动势是

$$e=Blv \ (\mathrm{V})$$

设电枢直径是 D(m)，电枢的转速是 n(r/min)，则有

$$v=\pi D\frac{n}{60} \ (\mathrm{m/s}) \qquad \therefore e=Bl\pi D\frac{n}{60} \ (\mathrm{V})$$

由于式中的 πDl 是电枢的表面积，所以 $B\pi Dl$ 代表总磁通量。

设磁极数为 p，每一极磁通量是 Φ(Wb)，则

$$B\pi Dl=p\Phi \ (\mathrm{Wb}) \qquad \therefore e=p\Phi\frac{n}{60} \ (\mathrm{V})$$

设电枢的总导体数是 Z，并联回路数是 a，因 Z/a 是串联的导体数，所以总的感应电动势 E(V)是：

$$E=e\frac{Z}{a}=p\Phi\frac{nZ}{60a}=\frac{pZ}{60a}\Phi n=k\Phi n \ (\mathrm{V}) \qquad (7.1)$$

式中，$k=\dfrac{pZ}{60a}$，对于叠绕 $a=p$，波绕 $a=2$。

电枢反应

在直流发电机中除了磁场产生的磁通外，当加上负载时电枢的导体流过电流，电枢的绕组产生磁通，从而使磁通的分布发生畸变。由于磁通减少会出现感应电动势下降、因中性轴偏移使电刷和整流子之间发生火花等影响。这种现象叫做**电枢反应**(见图 7.5)。

电枢反应

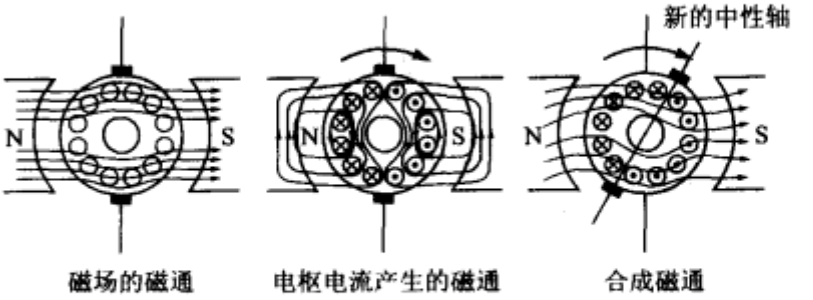


图 7.5　电枢反应

防止电枢反应的方法

补偿绕组　在磁极表面开槽并嵌入绕组，使之与电枢串联但电流方向与电枢电流相反（见图 7.6），这叫做补偿绕组。一般来说此法磁极构造复杂而且造价高，故只用在极大型的直流电机。

附加磁极　在主磁极之间设置称为附加磁极的小磁极并与电枢绕组串联，现在直流电机几乎都带有附加磁极。

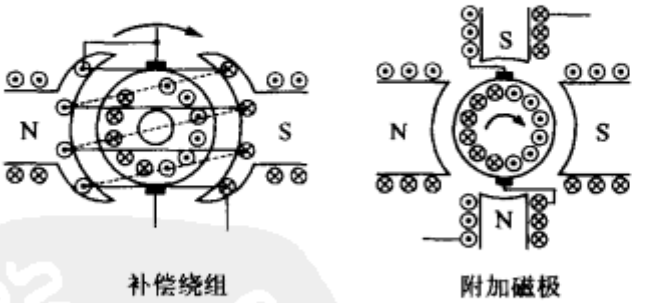


图 7.6　补偿绕组和附加磁极

直流发电机的特性

空载饱和特性　这是表示电机在空载情况下，以一定转速运行时励磁电流与感应电动势的关系。

外特性　这是表示当转速恒定并保持额定负载的励磁电流时负载电流与端电压的关系。

电压调整率　在外特性上，当空载时的端电压为 V_0(V)，额定负载时的端电压为 V_n(V)时

$$\text{电压调整率}=\frac{V_0-V_n}{V_n}\times 100\ (\%)$$

直流发电机的种类、特性和用途

他励发电机 励磁电流由其他电源供给(见图 7.7)。

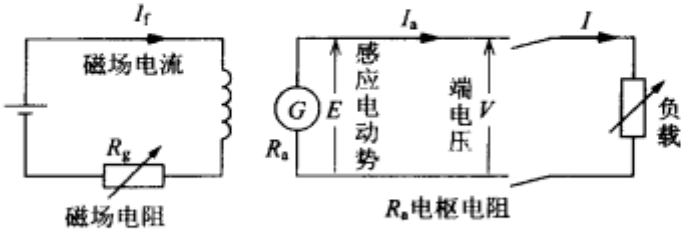


图 7.7 他励发电机

空载饱和特性 根据式(7.1)端电压 V 等于感应电动势 E 并与式(7.1)的磁通 Φ 成正比。由于铁心的饱和特性，励磁电流 I_f 与 Φ 不成正比，而呈现图 7.8 那样的特性。又由于铁心的磁滞作用，I_f 的增加与 I_f 的减少不一致，使铁心有剩磁而产生少许电压 V_r。

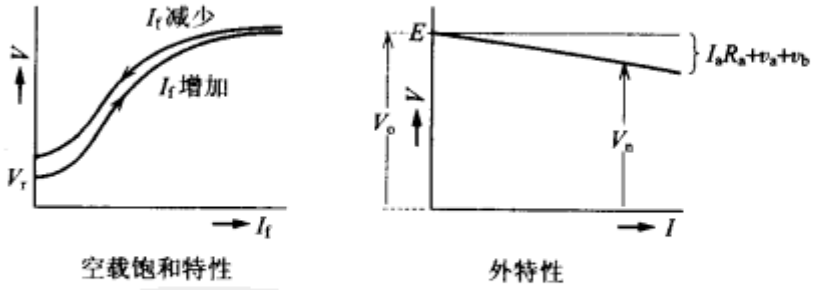


图 7.8 他励发电机的特性

外特性 接有负载时

$$E=V+I_aR_a+v_a+v_b$$

$$V=E-(I_aR_a+v_a+v_b)$$

其中，v_a 是电枢反应的电压降，u_b 是电刷的接触电阻形成的电压降。

用途 由于改变励磁电流可以使端电压在正、负的大范围内变化，可用作同步发电机的励磁机或发电机-电动机组方式的直流电源。

并励发电机 电枢与磁场绕组并联(见图 7.9)。

空载饱和特性与电压的建立 与他励情况相同，由铁心的剩磁产生电压 V_r，由 V_r 引起励磁电流，感应电动势增加和励磁电流的增加不断反复，如图 7.10 箭头所示电压上升

并到达 P 点。

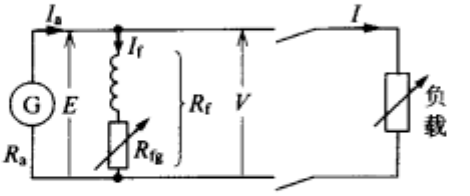
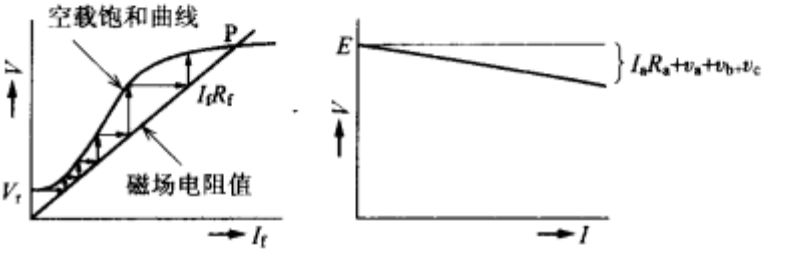


图 7.9　并励发电机



电压的建立　　外特性

图 7.10　并励发电机的特性

外特性　接上负载时

$$V=E-(I_aR_a+v_a+v_b+v_c)$$

v_a 和 v_b 与他励相同，u_c 是随 V 的减少导致 I_f 减少的电压降。

用途　不需要另备励磁电源，用励磁电阻即可调节电压，可作为一般直流电源使用。

串励发电机

串励发电机　电枢与励磁绕组串联（见图 7.11）。

外特性　串励发电机在无负载时没有励磁电流，所以不工作。外特性是将励磁绕组改用他励，然后从空载饱和特性求得（见图 7.12）。

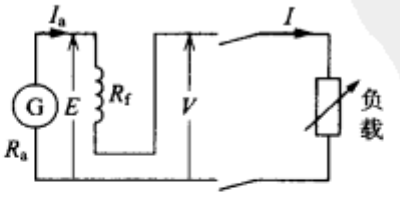


图 7.11　串励发电机

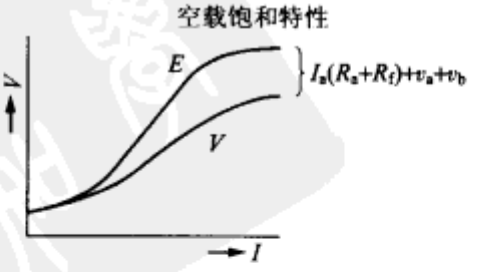


图 7.12　串励发电机的特性

用途 由于负载变动会使电压有很大变化，所以应用不多，有时当作直流输电线的升压机使用。

复励发电机

积复励

差复励

内并励

外并励

复励发电机 这种发电机同时具有并励磁场绕组 F_1，和串励磁场绕组 F_2。F_1 与 F_2 的磁通相互叠加的叫**积复励**，相互抵消的叫**差复励**；F_1 只和电枢并联的叫**内并励**，F_1 与电枢及 F_2 并联的叫**外并励**（见图 7.13）。

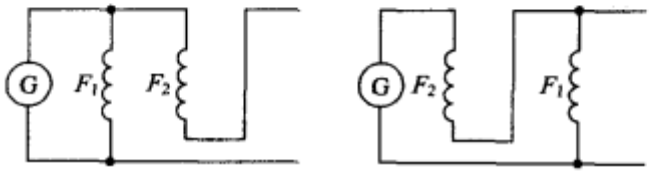


图 7.13 复励发电机

外特性 并励发电机随着负载增加端电压减少，串励发电机随着负载增加端电压却增加。所以适当选择积复励发电机串励绕组的磁通，可以做到满载电压与空载电压几乎相等。这叫做平**复励**（见图 7.14）。

平复励

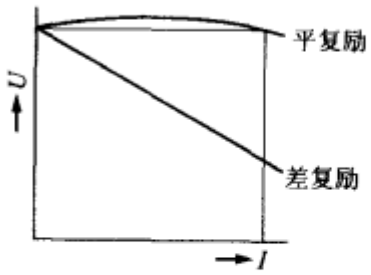


图 7.14 复励发电机的特性

用途 由于平复励发电机的电压基本恒定，与负载无关，可作为一般直流电源或励磁机使用。差复励发电机的电压随负载电流增大而减少，可用作直流焊接电源。

3　直流电动机的种类及特性

要　点

直流电动机的转速与各极的磁通成反比。

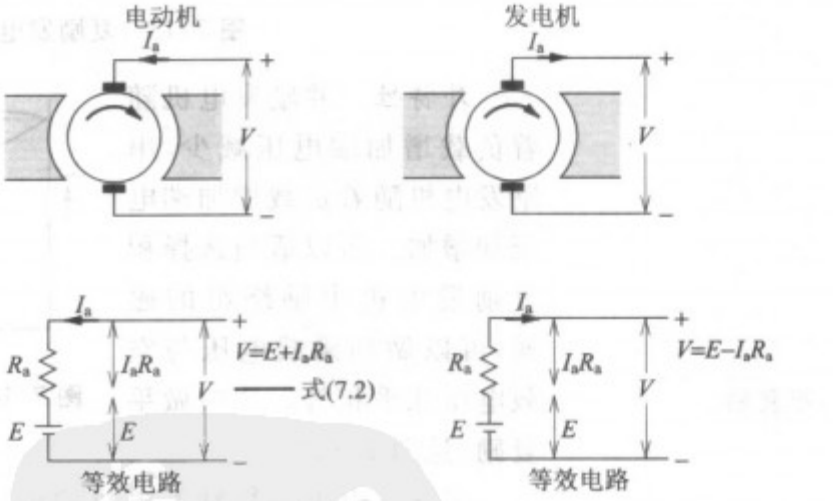
直流电动机发生的转矩与电枢电流和各极磁通之积成正比。其构造、种类与直流发电机相同。

解　释

反电动势与转速

给直流电动机加上端电压使之运行，由于电枢导体切割磁力线，根据右手定则产生感应电动势，这个电动势与端电压方向相反。因此把这电动势叫**反电动势**（见图 7.15）。

反电动势



V(V): 端电压　　E(V): 感应电动势　　I_a(A): 电枢电流　　R_a(Ω): 电枢电阻

图 7.15　电动机和发电机的等效电路

根据式(7.1)反电动势

$$E=k\Phi n \quad (\mathrm{V})$$

又由图 7.15 的式(7.2)得出

$$E=V-I_aR_a \quad (\mathrm{V})$$

故　$k\Phi n=V-I_aR_a$

即电动机的转速 n(r/min)可用下式表示：

$$n=\frac{V-I_aR_a}{k\Phi} \tag{7.2}$$

转矩与输出功率

设直流电动机的平均磁通密度是 B(T)，导体长度是 l(m)，导体中的电流是 i(A)，导体受到的电磁力是 F(N)，则 $F=Bli$(N)。设电枢直径是 D(m)，磁极数是 p，各磁极的磁通是 Φ(Wb)，总导体数是 Z，并联回路数是 a，电枢总电流是 I_a(A)，各导体产生的**转矩**是 τ(N·m)，则

转矩

$$\tau=F\times\frac{D}{2}=Bli\times\frac{D}{2}=\frac{p\Phi I_a}{2a\pi}\ (\mathrm{N\cdot m})$$

$$\left[B=\frac{pD}{\pi Dl}\ (\mathrm{T}),\quad i=\frac{I_a}{a}\ (\mathrm{A})\right]$$

总转矩 T 为：

$$T=Z\tau=K\Phi I_a\ (\mathrm{N\cdot m})$$

其中，$K=\frac{pZ}{2a\pi}$，与发电机相同，对于叠绕 $a=p$，对于波绕 $a=2$。另外，从图 7.15 的式(7.2)得出：

$$E=V-I_aR_a\ (\mathrm{V})$$

$$\therefore\quad EI_a=VI_a-I_a^2R_a\ (\mathrm{W})$$

式中等号右边第 1 项是电动机的输入功率，第 2 项表示电枢的铜损，左边是用电功率表示电动机的机械输出功率。

机械输出功率 P_m(W)用下式表示：

$$P_m=EI_a=k\Phi nI_a=\frac{pZ}{60a}\Phi nI_a=2\pi\frac{n}{60}T\ (\mathrm{W})$$

因式中 $2\pi\frac{n}{60}$ 与电枢导体的角速度 ω(rad/s)相等，故

$$P_m=\omega T(\mathrm{W})$$

从 P_m 当中减去因电动机旋转带来的机械损耗及电枢的铜损，就是有效的机械输出功率。

所以电动机的输出功率

$$P=P_m-(\text{机械损耗}+\text{电枢铜损})\ (\mathrm{W})$$

电动机的电枢反应

电枢反应是因电枢绕组中流过电流而发生的现象，所以电动机和发电机都会有电枢反应。假如旋转方向、磁极的极性、端子的极性与发电机一样，因电枢电流方向相反，电动机的磁通分布发生的畸变就与发电机情况不同，是与旋转方向

相反的。即补偿绕组、附加磁极的极性也要与发电机相反，但电动机的电枢电流方向是反的，其连接仍可以和发电机相同。

直流电动机的特性

速度特性　表示端电压与励磁电阻为一定时，负载电流与转速的关系。

转矩特性　表示端电压与励磁电阻为一定时，负载电流与转矩的关系。

转差率　与发电机的电压调整率相对应。假设在额定电压下，额定负载时的额定转速为 n(r/min)，空载时转速为 n_0(r/min)，则

$$\text{转差率}=\frac{n_0-n}{n}\times 100\quad(\%)$$

直流电动机的种类、特性与用途

(1) 并励电动机

当负载变化时速度变化小，用励磁电阻即可简单地宽范围调节速度，作为定速或调速电动机，广泛用于机床、压延机等(见图 7.16)。

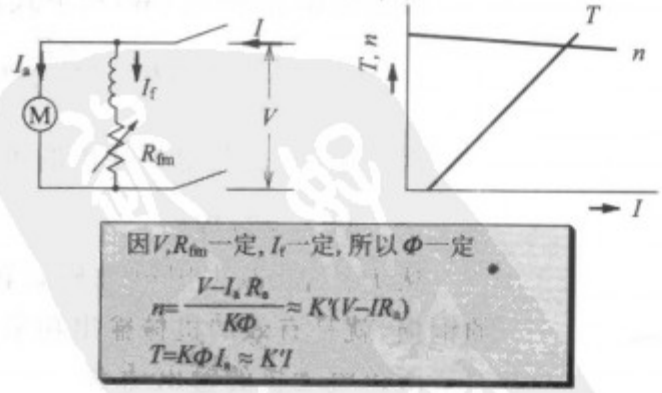


图 7.16　并励电动机及其特性

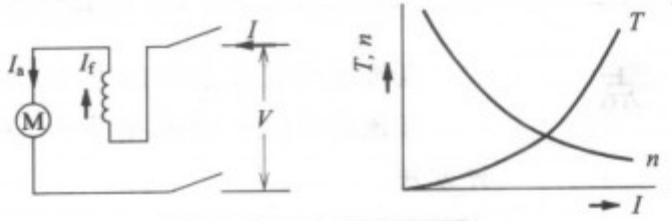
(2) 串励电动机

具有启动转矩大，负载增减时速度也自动变化的特性，用于电气化铁路、起重机、卷扬机等(见图 7.17)。

(3) 复励电动机

积复励电动机　特性介于并励与串励之间，按照并励绕

组与串励绕组磁通的比例，可得到近于并励特性或串励特性。



因 $I=I_a=I_f$

故 $n=\dfrac{V-I_aR_a}{K\Phi}\approx k\dfrac{V}{I}$

$T=K\Phi I_a=K'I^2$

图 7.17　串励电动机及其特性

差复励电动机　由于串励绕组对于并励绕组的磁通有抵消作用，在负载电流增加时磁通减少速度上升。这样可以保持近于恒定的速度，但因启动转矩小而不常使用。

积复励电动机虽然与串励电动机特性相似，但在空载时也不会有飞车（速度异常高）的危险，用于卷扬机或机床等（见图 7.18）。

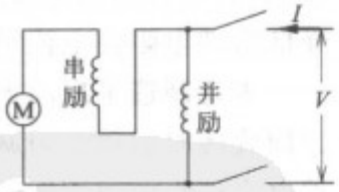


图 7.18　复励电动机

4　直流电动机的运行

要　点

直流电动机在启动时流过大电流，所以要用启动器。

直流电动机的调速有调节励磁、调节电阻和调节电压三种方法。

解　释

直流电动机的启动与启动器

由式(7.2)可知，直流电动机的电枢电流 I_a 为：

$$I_a=\frac{V-E}{R_a}=\frac{V-K\Phi n}{R_a}\ (\mathrm{A})$$

因启动时 $n=0$，启动电流 I_a' 为：

$$I_a'=\frac{V}{R_a}\ (\mathrm{A})$$

启动电阻

电枢电阻 $R_a(\Omega)$一般很小，如电流 I_a' 很大会烧坏绕组或电刷。所以在启动时必须将**启动电阻**与电枢绕组串联以限制启动电流。但是一转起来就会产生反电动势减少启动电流，启动转矩也随之减少。因此当启动电流一减少就必须降低启动电阻使电流增加。启动结束后启动电阻必须为零。

为此制造了启动器(见图 7.19)。启动器的手柄沿箭头方向旋转时启动电阻减少，在最终位置电阻为零，同时手柄被电磁铁吸引而固定住。电源开关断开或停电时，因电磁铁

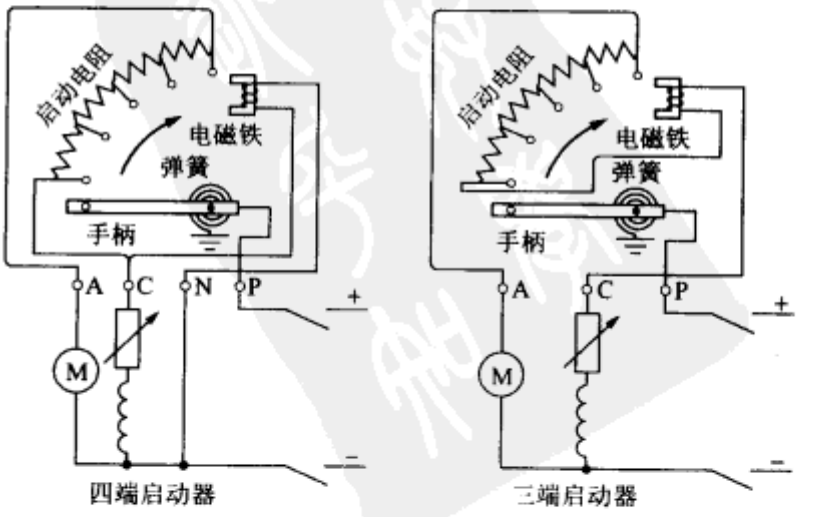


图 7.19　启动器

失去吸力，由弹簧力使手柄自动回到启动位置。

直流电动机的调速方法

由式(7.1)得出

$$n=\frac{V-I_aR_a}{k\Phi}\quad(\mathrm{r/min})$$

因此，调速可用以下三种方法：

① 调节磁场法。改变磁场的磁通。

② 调节电阻法。改变电枢的电流。

③ 调节电压法。改变端电压。

调节磁场法　是使磁通 Φ 变化以改变 n 的方法。将可变电阻串联或并联到励磁绕组，改变励磁电流使磁通变化(见图 7.20)。此法因励磁电流小而损耗少，可在较宽范围调整速度；这个可变电阻 R_{fm} 叫**磁场电阻**或**速度调整器**。

磁场电阻

速度调整器

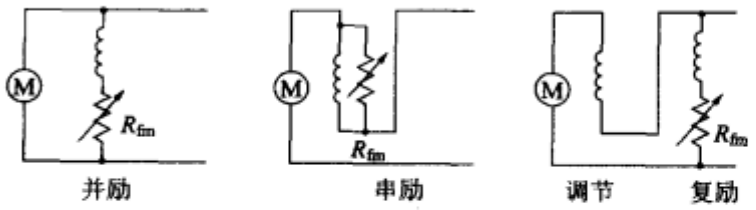


图 7.20　磁场法

调节电阻法　是将电枢绕组串联一电阻 R_s，用改变电枢电流 I_a 使转速 n 变化的方法(见图 7.21)。主要用于串励电动机，与下述的电压控制法中串并联控制方式合并使用。

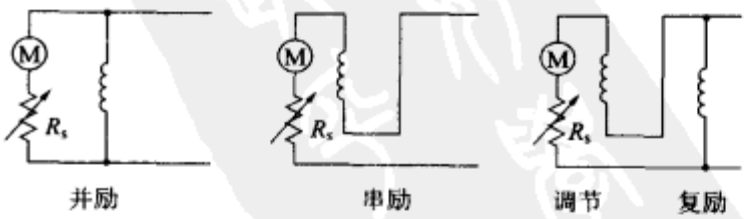


图 7.21　电阻法

调节电压法　是改变加到电枢绕组上电压来使速度变化的方式。这种控制法中有发电机-电动机组方式，现在几乎都用晶闸管相位控制的**静止发电机-电动机组方式**。

静止发电机-电动机组方式

另外，在电气化铁路中也有把两个串励电动机用改变串

联、并联的串并联调速方式。

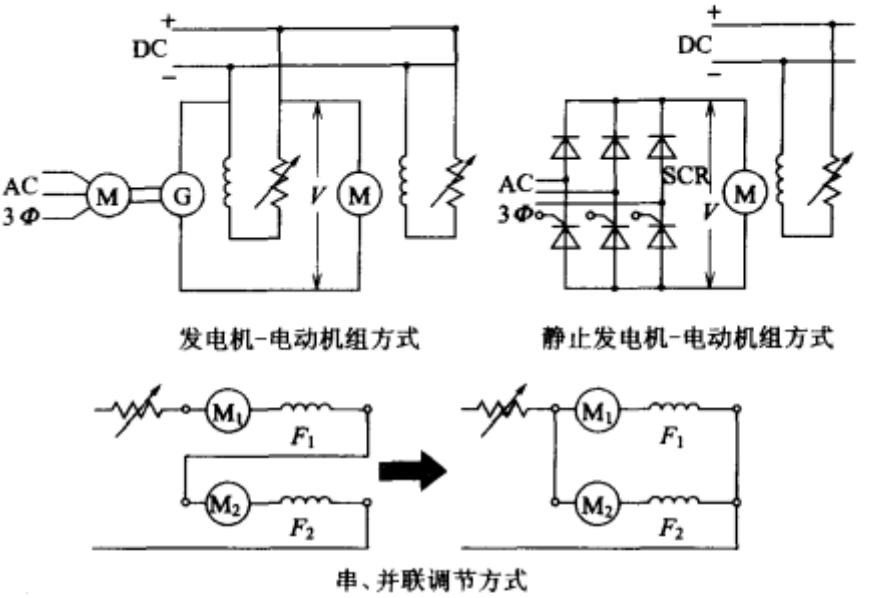


图 7.22　电压调节法

反转　要改变电动机的旋转方向，可以将电枢的电流或磁场磁通方向中的一个改变即可。但即使改变电源的极性，也因电枢电流和磁通方向同时改变而不能改变旋转方向。一般来说，磁场绕组的电抗大，不适于接通切断，而只采用切换电枢绕组的连接使电动机反转。

发电制动
再生制动
反接制动

制动　要使电动机停止，可以用切断电源、带负载的**发电制动**、反电动势高于电源电压时使电流流向电源的**再生制动**、将电枢绕组反接的**反接制动**等方法。

5　什么是变压器

要　点

变压器是从一个回路接受交流电，由电磁感应作用使其变化并供给另一回路电力的装置。

利用变压器可以很容易地改变交流电压的大小。

解　释

变压器的原理

一次绕组

二次绕组

变压器工作原理如图 7.23 所示，在共同磁路的铁心上绕有输入边（原边）的绕组（又叫**一次绕组**，匝数是 n_1）及输出边（副边）的绕组（又叫**二次绕组**，匝数是 n_2），由于输入边和输出边的电磁耦合，把输入边的电力供给输出边。

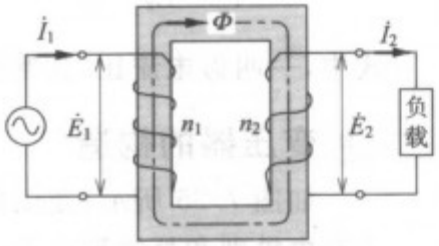


图 7.23　变压器的工作原理

如图 7.24 所示，利用电磁感应作用的互感，将线圈 C_1 与 C_2 相对安放并插入铁心使磁通 Φ 容易通过。用电池向 C_1 通入电流，只有在开关 S 通断的瞬间，连接到 C_2 的检流计 G 的指针会摆动。这是因为 C_1 产生的磁通 Φ 在 S 通断时发生变化，它与 C_2 铰链的磁通就发生变化而产生电动势。

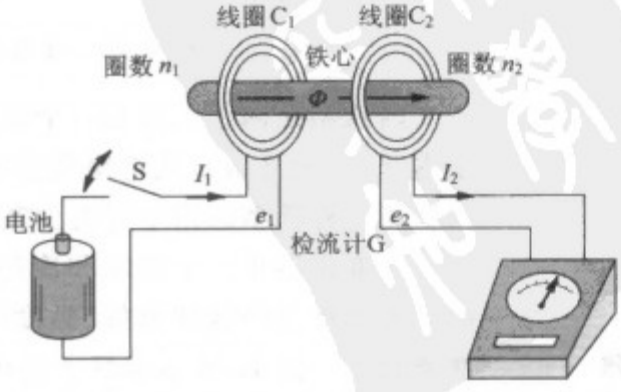


图 7.24　线圈之间的互感

假定 C_1 与 C_2 的电动势是 e_1 和 e_2，在 Δt 时间内磁通的变化是 $\Delta\Phi$(Wb)，则

$$e_1 = -n_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\ (\mathrm{V}) \qquad e_2 = -n_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\ (\mathrm{V})$$

假设是正弦波交流，最大磁通是 Φ_m(Wb)，频率是 f(Hz)，感应电动势的有效值是

$$E_1 = 4.44 f n_1 \Phi_m\ (\mathrm{V}), \quad E_2 = 4.44 f n_2 \Phi_m\ (\mathrm{V})$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} = a$$

匝数比
变压比

式中，a 叫**匝数比**，$\frac{E_1}{E_2}$ 叫**变压比**。

假设铁心及线圈内没有损耗，则 $E_1 I_1 = E_2 I_2$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} = a$$

电流比
变流比

式中，$\frac{I_2}{I_1}$ 叫做**电流比**，其倒数 $\frac{1}{a} = \frac{I_1}{I_2}$ 叫**变流比**。

变压器的构造

如图 7.25 所示，变压器由绕组和铁心组成。按组合形式有**内铁型**和**外铁型**两种。

内铁型
外铁型

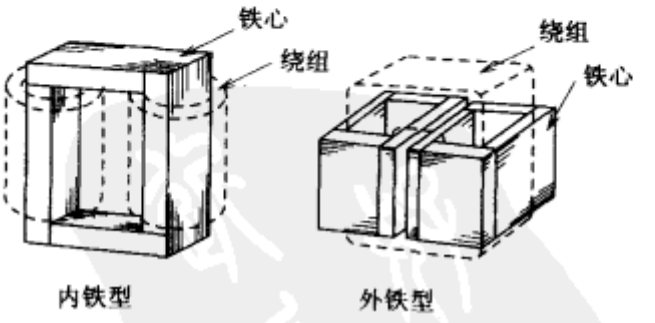


图 7.25　变压器的构造

内铁型是两个电路和一个磁路，相对于绕组来说铁心处于内部，一般绕组多从绝缘角度考虑，高电压用的变压器是内铁型。外铁型的则是绕组少铁心大。

变压器油

在变压器里为了绝缘和冷却使用**变压器油**。变压器油的必要条件是绝缘性能好、黏度低，而且在高温使用时化学性能稳定。图 7.26 表示**杆上变压器**中变压器油的情况。

杆上变压器

变压器内产生的铜损和铁损都变成热量，使变压器油的

温度升高，由外箱的表面向大气中自然发散。杆上变压器的外箱表面有散热片以便更好地散热。变压器容量大时靠自然散热是不够的，要用机械方法冷却。其方法有用通风机送冷空气、用泵使冷却水与外箱接触等。



图 7.26 杆上变压器的示例

变压器的噪声

问：为什么走到变压器旁边可以听到很低的“嗡嗡”声呢？

答：那声音的频率是使用变压器频率的倍频。

问：那频率是多少啊？

答：因为使用的频率是 50Hz，所以是 100Hz、200Hz 吧。

问：那是为什么呢？

答：最主要的原因就是由于铁心的磁应力，就是铁心由于磁化导致伸缩，产生振动。它使周围的空气振动，就发出噪声啦！

6　变压器的特性

要　点

变压器的主要特性是电压调整率及效率。像杆上变压器那样不带电压调整器的变压器，希望电压调整率要小。

解　释

变压器的等效电路及相量图

研究变压器的特性时可以用等效电路及相量图，示于图 7.27中。

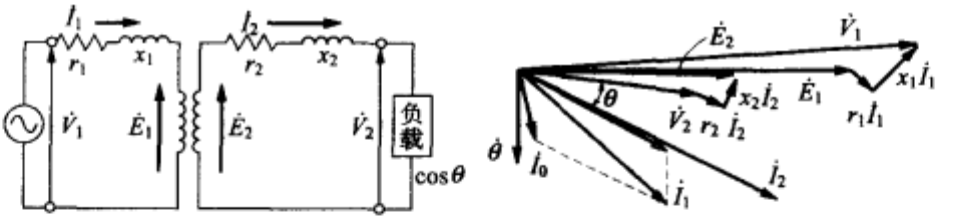


图 7.27　变压器的等效电路和相量图

电压调整率

变压器中有因绕组电阻 r 的电压降和因漏磁通绕组的电抗 x 的电压降，使得负载电流有变化时变压器的端电压也变化，这叫做**电压调整率**。

电压调整率

设额定使用时副边端电压是 V_2，空载时端电压是 V_{20}。图 7.28 表示从原边折算到副边的简化等效电路，电压调整率 ϵ 是：

$$\epsilon=\frac{V_{20}-V_2}{V_2}\times 100=\frac{\overline{OF}-\overline{OA}}{\overline{OA}}\times 100$$

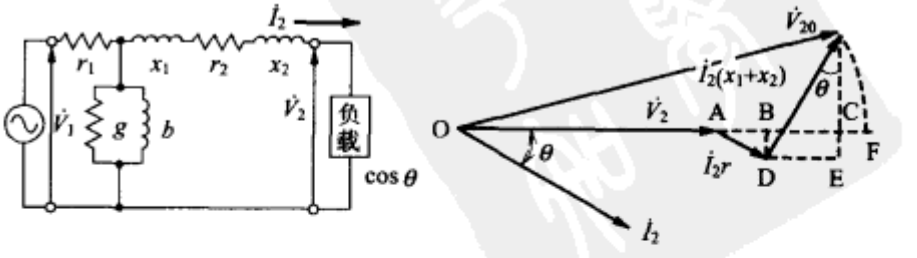


图 7.28　折算到副边的等效电路和相量图

$$\approx\frac{\overline{AC}}{\overline{OA}}\times 100=\frac{\overline{AB}+\overline{BC}}{\overline{OA}}\times 100$$

$$=\frac{I_2 r\cos\theta+I_2 x\sin\theta}{V_2}\times 100$$

%电阻压降
%电抗压降

把 $p=\dfrac{I_2 r}{V_2}$ 叫做**%电阻压降**，$q=\dfrac{I_2 x}{V_2}\times 100$ 叫做**%电抗压降**，即可以用 $\varepsilon=p\cos\theta+q\sin\theta$（%）表示电压调整率。

变压器的损耗及效率

变压器没有旋转部分，所以没有机械损耗。有带负载使用时的**负载损耗**及空载时的**空载损耗**。

负载损耗
空载损耗

图 7.29 表示负载损耗就是将副边短接，在原边加上额定频率的低电压，当电流为额定值时的输入功率。

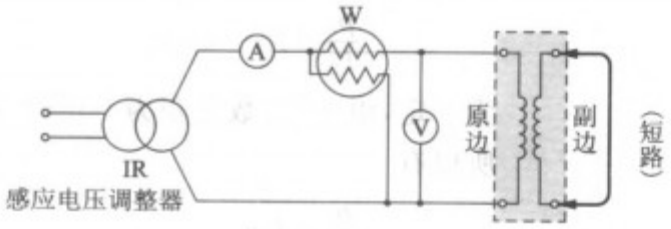


图 7.29 负载损耗的测定（短路试验）

铜损
杂散损耗

在负载损耗当中有因绕组流过电流的**铜损**及**杂散损耗**。以 I_1 和 I_2 分别表示原边和副边电流；以 r_1 和 r_2 表示原边和副边的绕组电阻时，铜损 p_c 是：

$$p_c=I_1^2 r_1+I_2^2 r_2=I_2^2 r_0\ (\mathrm{W})$$

式中，r_0 是折算到副边的绕组电阻。

杂散损耗是由于漏磁通过固定铁心的零件时产生的涡流损耗，一般极小。图 7.30 表示空载损耗就是将原边开路，

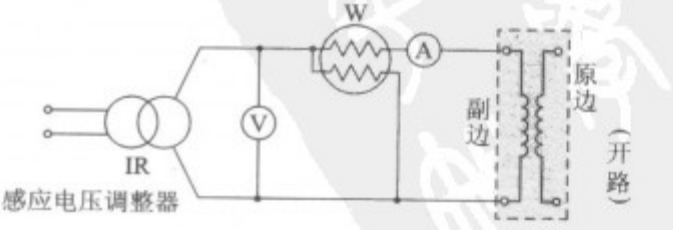


图 7.30 空载损耗的测定（空载试验）

在副边加上额定频率的额定电压时的损耗。其中也有励磁电流在绕组中产生的铜损及绝缘体的介电损耗，但大部分是

铁损

铁损。铁损由磁滞损耗和涡流损耗组成。

满载效率

满载效率 $\eta(\%)$是：

$$\eta=\frac{\text{输出功率}}{\text{输出功率}+\text{损耗}}\times 100\ \%$$

$$=\frac{V_2 I_2\cos\theta}{V_2 I_2\cos\theta+p_i+p_c}\times 100\ \%$$

$$=\frac{V_2\cos\theta}{V_2\cos\theta+\frac{p_i}{I_2}+I_2 r_a}\times 100\ (\%)$$

如果 V_2、$\cos\theta$、r_a、p_i 为一定，则当 $\frac{p_i}{I_2}+I_2 r_a$ 最小时，效率最高。

考虑到

$$\frac{p_i}{I_2}\times I_2 r_a=p_i r_a$$

为一定，由于“二数之积为一定时，如果二数相等其和最小”，所以有

$$\frac{p_i}{I_2}=I_2 r_a$$

因此

$$p_i=I_2^2 r_a$$

$$p_i=p_c$$

即铁损及铜损相等时效率最高。

7 变压器的运行

要 点

变压器有时单独使用，但随着负载增加往往将数个变压器并联接线使用。这叫变压器的并联运行。如果各个变压器接线的极性不一致，就不能输出电压或造成短路。

解 释

变压器的极性与并联运行

图 7.31 表示在把两台单相变压器 A 和 B 并联时，副边的电动势 E_{2A} 和 E_{2B} 必须一致。

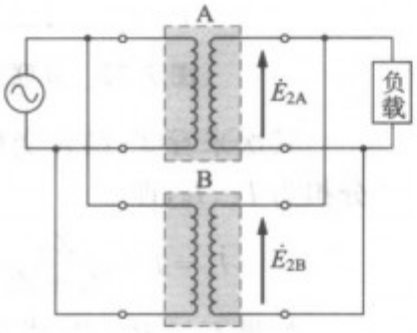


图 7.31 单相变压器的并联

在图 7.32 中，把原边、副边的电动势即极性在同方向引出的叫**减极性**。一般变压器是减极性的。在端子符号上，从原边看外箱右侧的端子用大写字母 U 另一端用 V，

减极性

在副边用小写字母 u 和 v。减极性的 U 和 u 在同一侧，**加极性**的则处在对角线上。

加极性



图 7.32 变压器的极性与端子符号

并联运行的条件

以下条件是必要的：

① 极性要一致。

② 匝数比要相等。

③ 阻抗电压要相等。

④ 漏抗的相位角要相等(内阻与电抗之比要相等)。

首先,如果①和②做不到,变压器之间就有环流会烧坏绕组。等效电路示于图 7.33。

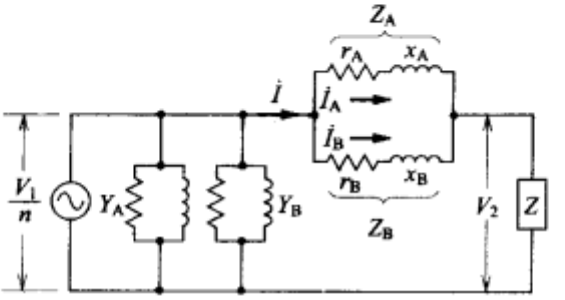


图 7.33　并联运行的副边折算等效电路

其次来看③,结合变压器的容量 P_A、P_B,将负载电流 I 分担为 I_A、I_B,即

$$\dot{I}_A=\dot{I}\times\frac{Z_B}{Z_A+Z_B}\qquad \dot{I}_B=\dot{I}\times\frac{Z_A}{Z_A+Z_B}$$

如果不与 P_A、P_B 成正比,就会超过额定容量。

还有关于④,图 7.33 中变压器 A 和 B 的容量 P 相等,$I_A=I_B$,$Z_A=Z_B$,如果使

$$\dot{I}_A=r_A+jx_A\qquad \dot{I}_B=r_B+jx_B\qquad \frac{x_A}{r_A}\neq\frac{x_B}{r_B}$$

则如图 7.34 所示,$\dot{I}_A$ 与 $\dot{I}_B$ 产生相位差 θ 而不能同相。



图 7.34　$\dot{I}_A$ 与 $\dot{I}_B$ 的相位差 θ

8 变压器的接线

要 点

在使用三相电时要用三相变压器，有时也使用3台或2台单相变压器。

在接线的组合中有△-△、△-、Y-Y、△-Y-Y接法及V-V接法等5种。

这些变压器不仅是容量、电压、频率，而且绕组电阻 r、漏抗 x 等也必须相等。

解 释

△-△接法

因线电压与相电压相等，线电流是相电流的$\sqrt{3}$倍，可以加上相当于1台额定容量3倍的负载，所以用于低电压、大电流的配电线上。

即使1台有故障，其余2台可以用V形接法。但是中点不能接地(见图7.35)。

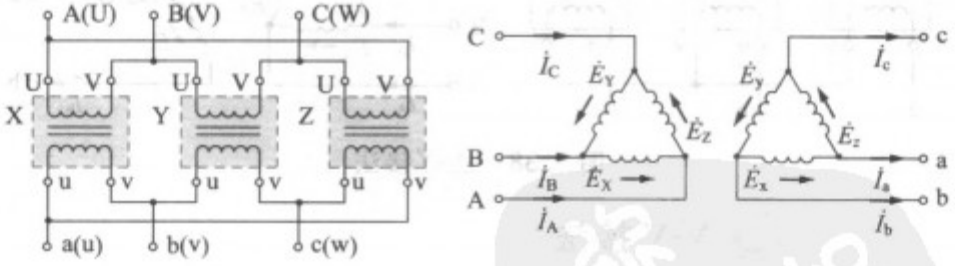


图7.35 △-△接法

Y-Y接法

一般不使用，但Y-Y-△接法用于超高压输电。如果中点接地，相电压就是线电压的$1/\sqrt{3}$倍，绝缘就变得容易。但V形接法不可以(见图7.36)。

Y-△接法，△-Y接法

这两种接法的中点可以接地。此外线电压是相电压的$\sqrt{3}$倍，所以用在输电系统的送电端和受电端。但V形接法不可以，因原边、副边有30°的相位差(见图7.37，图7.38)。

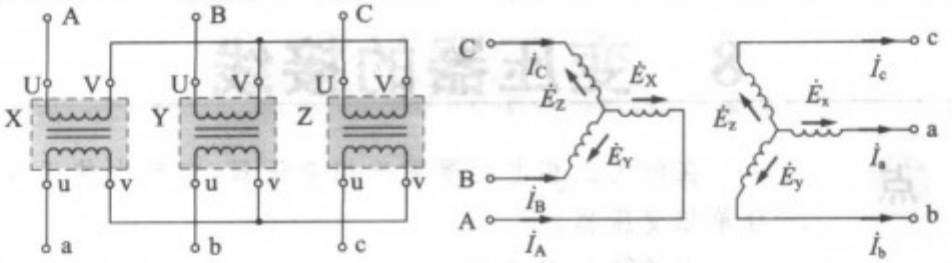


图 7.36　Y-Y 接法

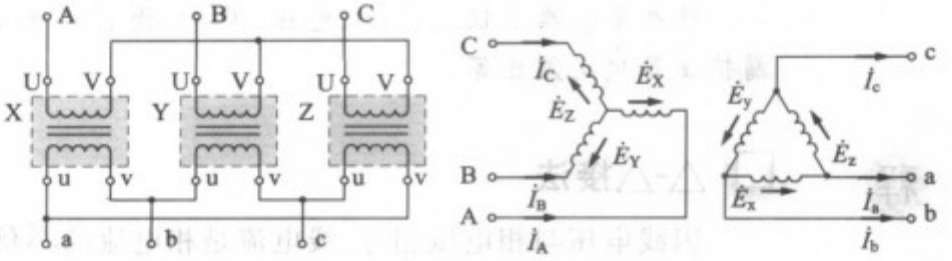


图 7.37　Y-△接法

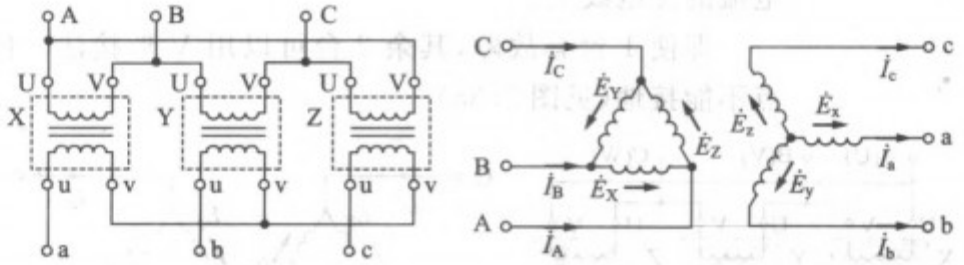


图 7.38　△-Y 接法

V-V 接法

图 7.39 表示去掉一台△-△接法的变压器，将两台接入三相电，△形少了一边成为 V 形。可用在△-△运行中有一台发生故障的情况，或用在预定今后负载增加时用△-△接法的场合。

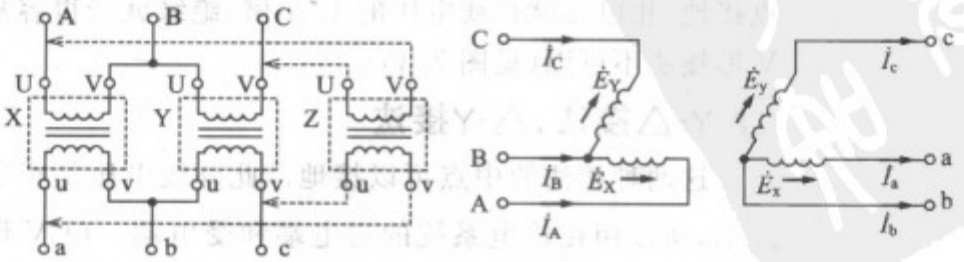


图 7.39　V-V 接法

用这种接法能提供的电力，是一台变压器容量的$\sqrt{3}$倍，而不是 2 倍。利用率是$\sqrt{3}/2=0.866$，所以变小了（见图 7.39、图 7.40）。

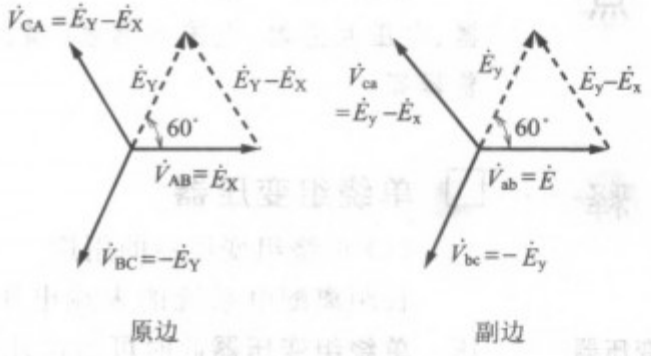


图 7.40 V 接法的电压相量图

斯柯特接法

图 7.41 表示用 2 台变压器从三相电源得到 2 组单相电力，在铁路上交流馈电用的变电所等处得到应用。

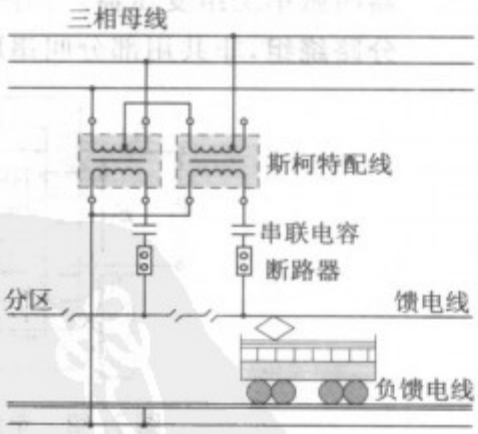


图 7.41 斯柯特接法的应用示例

要从三相电路得到大功率单相电力，从一相取用会造成不平衡。如果把一台变压器的原边绕组作成另一变压器绕组的$\sqrt{3}/2$倍，在副边即可得到具有 90°相位差的二相交流。

群容量
利用率

各变压器的原边、副边的额定电压和容量等参数相同时，称三相接线的变压器群为 1 群，其可能使用的容量叫**群容量**。另外群容量与各变压器容量之和的比称为**利用率**。对于 V 接法或斯柯特接法是$\sqrt{3}/2=0.866$，用其他接法是 1。

9 特殊变压器的种类和用途

要 点

除上述单相变压器、三相变压器以外，还有单绕组变压器、电压互感器、电流互感器、漏磁变压器、单相感应电压调整器等。

解 释

单绕组变压器

(1) 单绕组变压器的用途

长距离配电系统的末端电压降很大，必须提高一些电压。**单绕组变压器**此时可当作升压器，还可用在连接电压不同的输电系统。另外，也可作为小容量的滑动式自耦调压器使用。

单绕组变压器

(2) 单绕组变压器的构造和特性

在铁心上设有绕组，有一部分绕组是共用的，这种变压器叫做单绕组变压器。如图 7.42 所示。绕组共用的部分叫**分路绕组**，非共用部分叫**串联绕组**。

分路绕组

串联绕组

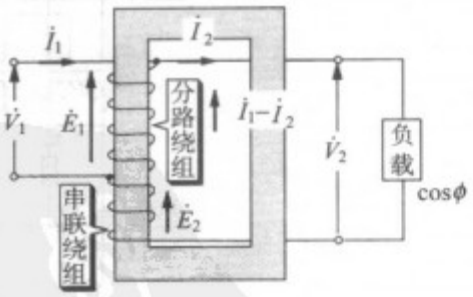


图 7.42 单绕组变压器的构造

在图 7.42 中

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

$$E_1 I_1 = (E_1 + E_2) I_2$$

因 $\dot{I}_1$ 与 $\dot{I}_2$ 同相，在单绕组变压器里，ab 之间的绕组只流过 $\dot{I}_1 - \dot{I}_2$ 的电流，若 V_1 越接近 V_2，即匝数比 a 越接近 1 分路绕组就可以作得越细，可以节约用铜量。

在图 7.43 中，若 E_2 是额定电压，I_2 是额定电流，变压

自身容量
固有容量
负载容量
线路容量

器额定容量就是 $E_2 I_2$。$E_2 I_2$ 叫**自身容量或固有容量**。而通过单绕组变压器供给的电力是 $V_2 I_2 = (E_1 + E_2) I_2$，称此为**负载容量或线路容量**。

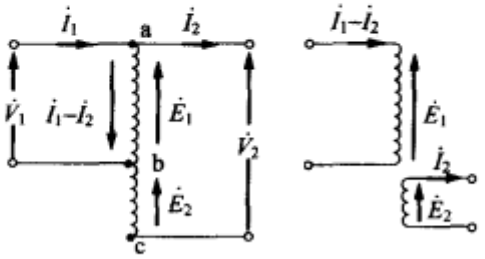


图 7.43　单绕组变压器的自身容量

$$\text{自身容量} = \text{串联绕组电压}(E_2) \times \text{电流}(I_2)$$

$$= \text{升压电压}(E_2) \times \frac{\text{负载容量}[(E_1+E_2)I_2]}{\text{副边线电压}(E_1+E_2)}$$

单绕组变压器的优点如下：

① 能以小的自身容量来处理大的负载容量。

② 因原边、副边共用绕组所以**没有漏磁**，漏抗小，电压调整率小。

这些优点在 V_1 与 V_2 之差小时有效，所以一般取 V_1 与 V_2 之比在 1∶2 以下。缺点是因绕组的一部分共用，低电压侧与高电压侧必须是同一绝缘。

要升高或降低三相交流电压，除了用三相单绕组变压器外，还可用 3 台单相变压器作成Y接法或△接法，或以 2 台按 V 接法使用。另外，Y形接法如图 7.44 所示，还可用作三相感应电动机的启动补偿器。

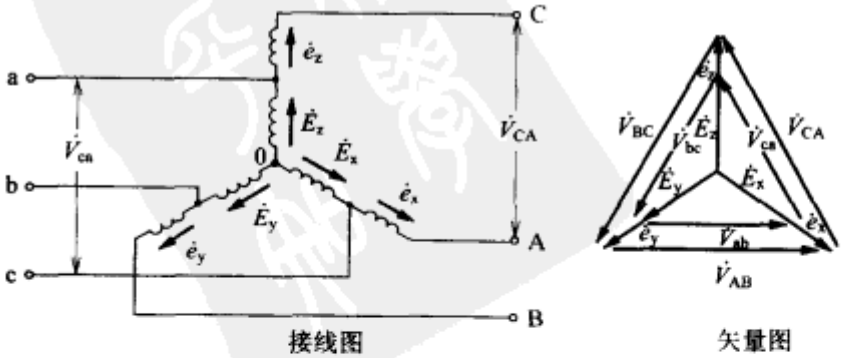


图 7.44　Y形接法

电压互感器

电压互感器
双绕组变压器

电压互感器(VT：Voltage Transformer)示于图 7.45，是把原边接到待测量的高压电路，副边接电压表的小容量**双绕组变压器**。副边电压规定是 110V。因原边电压极高，即使容量小，绕组的圈数却非常多。此外，还要注意降低绕组的电阻和漏抗以减少测量误差。

图 7.46 表示测量三相电路的线电压时，以 2 台电压互感器的 V 形接法。

电压互感器的构造，在室内低电压采用干式，否则用充油式。

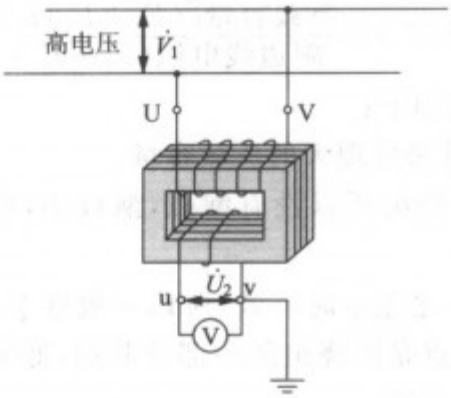


图 7.45　电压互感器的原理

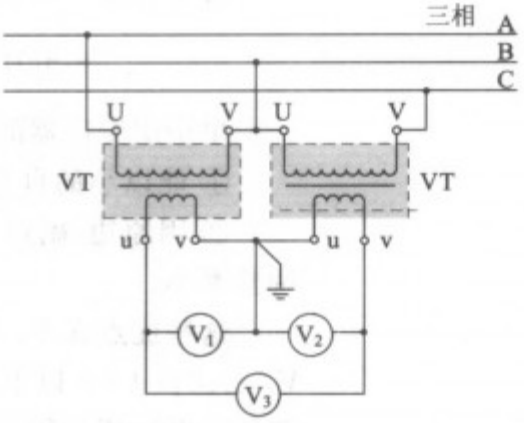


图 7.46　三相电路的电压测定

电流互感器

(1) 电流互感器的原理

电流互感器(CT：Current Transformer)示于图 7.47。原边与电路串联，副边接电流表或功率表、继电器等的电流线圈，可以间接地测量电流或使继电器动作。副边额定电流的标准是 5A。因相对原边电流的励磁电流比大，变流比 I_1/I_2 和匝数比 n_1/n_2 不一致。为减少由此引起的测量误差，要选用磁导率高的铁心，并注意加大截面积。

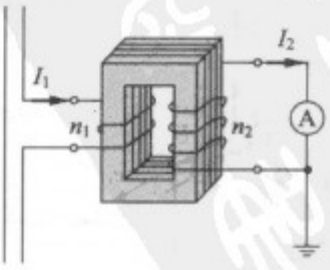


图 7.47　电流互感器的原理

(2) 电流互感器的构造及特性

电流互感器的构造示于图 7.48。原边是一条直线形的导体棒或是绕有数圈的绕组组成。绕组式的可以用到1000A,棒式的用于测量大电流。在低电压时用干式,高电压则用充油式。

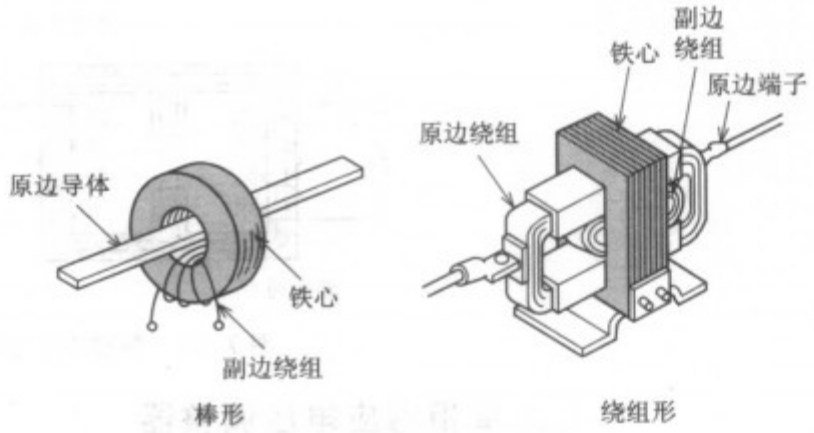


图 7.48 电流互感器的构造

图 7.49 表示把 2 台电流互感用 V 形接法,可以测定三相电路的电流。因 $\dot{I}_A+\dot{I}_B+\dot{I}_C=0$,在副边也是 $\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c=0$,即 $\dot{I}_a+\dot{I}_c=-\dot{I}_b$,电流计Ⓐ$_3$就表示 I_b。此外,电路图只画了副边绕组,没有画原边绕组。

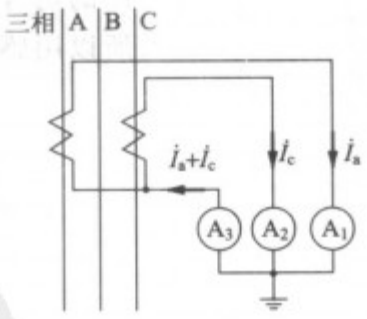


图 7.49 三相电路的电流测定

电流互感器的原边流过电流时,副边不可以开路。否则副边电流为零,原边电流全部成为励磁电流产生大量磁通使铁心饱和。磁通密度大则增加铁损,其热量导致绝缘破坏。所以要拆下电流互感器副边的仪表时,必须先把互感器的副边端子短路。

漏磁变压器

一般制造变压器是把原边、副边绕组绕在同一铁心上使之没有漏磁。但与其相反,漏磁变压器如图 7.50 所示,原

漏磁通

边、副边绕组绕在各自的铁心上，为**漏磁通**设置磁路。当负载电流 I_2 增加时，漏磁通也增加，副边电压减少，使电流大致保持恒定。

由于这种定电流特性，可用于日光灯的镇流器、霓虹灯的变压器、氩弧焊接机用的变压器等。

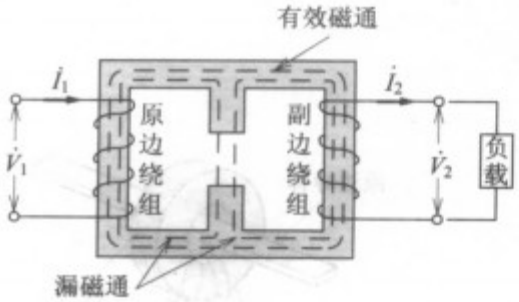
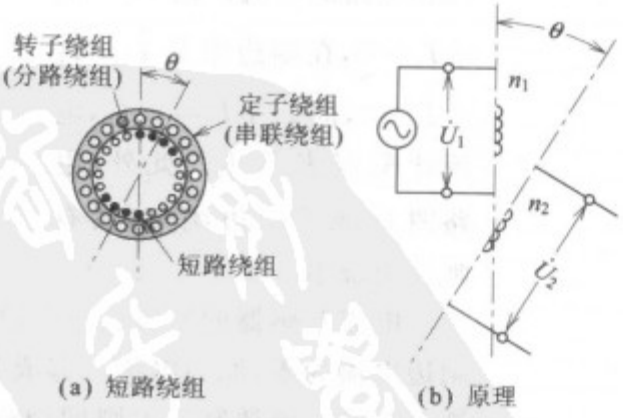


图 7.50　漏磁变压器

单相感应电压调整器

要想在一定范围内平滑地调整电压时，在大容量、高电压的场合，用自耦调压器等的滑动式电压调整器是困难的，所以用感应电压调整器，也叫旋转变压器，见图 7.51。



(a) 短路绕组　　(b) 原理

图 7.51　单相感应电压调整器

分路绕组
串联绕组

感应电压调整器有两个绕组，一个绕组(分路绕组)可以旋转，另一个绕组(串联绕组)固定。利用**分路绕组**和**串联绕组**轴线的倾角 θ，可知输出电压 $\dot{V}_2$ 为：

$$\dot{V}_2 = V_1 \times \frac{n_2}{n_1} \cos\theta$$

10　什么是三相感应电动机

要　点

感应电动机可以用商用电源，一般是结构简单、坚固，使用方便而且价廉，所以使用广泛。

解　释

旋转磁场的产生和同步转速

旋转磁场

图 7.52(a)表示把定子连成三相并加以三相交流电，沿相序方向就会产生**旋转磁场**。

图 7.52(b)是 2 极，三相交流的一个周期转一圈。若线圈数作成 2 倍就是 4 极，交流电的每一个周期旋转磁场转 1/2 圈。总之，以 p 为极数，转速就是 $2/p$。转速与 p 成反比，与频率成正比。

同步转速

所以用 p 表示旋转磁场的极数，用 f(Hz)表示交流频率，旋转磁场的转速 N_s(r/min)可用下式表示，叫做**同步转速**：

$$N_s=\frac{60}{p/2}f=\frac{120f}{p}$$

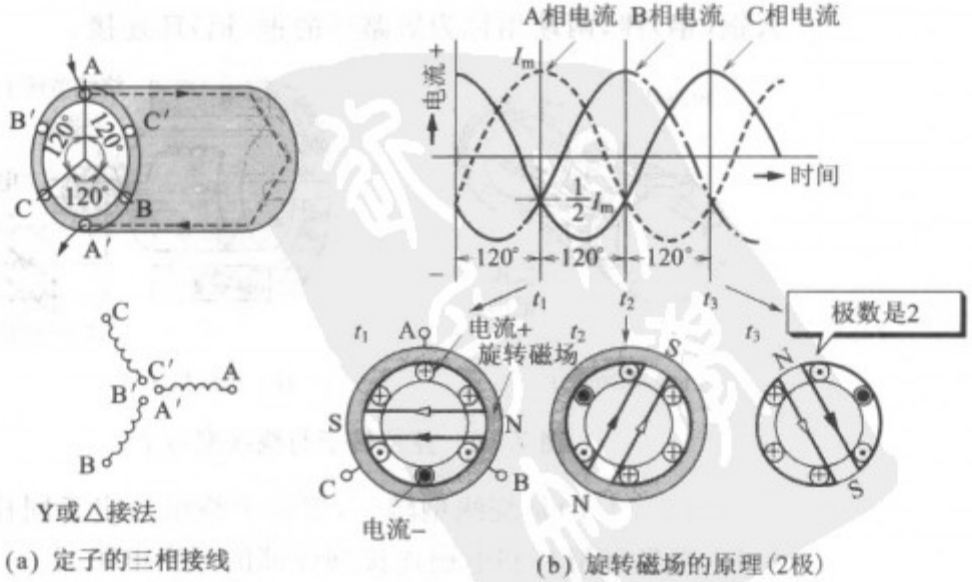


图 7.52　旋转磁场的原理

转子的转矩与旋转方向

如图 7.53 所示，如果旋转磁场的磁力线切割转子的导体，导体里就有感应电动势并流过感应电流。由此电流与旋转磁场间的电磁力形成**转矩**，其**旋转方向**与旋转磁场同向。

转矩

旋转方向

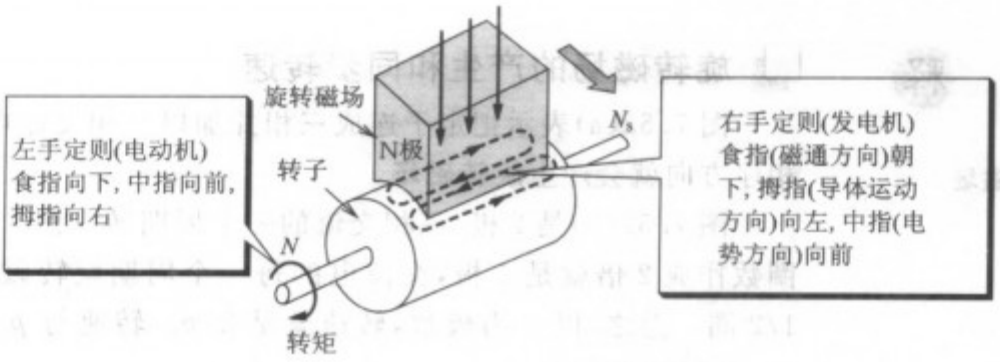


图 7.53　作用在转子上的转矩与旋转方向

笼型和绕线型

笼型感应电动机

绕线型感应电动机

三相感应电动机按照转子的构造可分为**笼型感应电动机**和**绕线型感应电动机**，图 7.54(a)是笼型转子，是用厚度为 0.35～0.5mm 的硅钢片叠积而成。在转子铁心的槽内插入铜(铝)棒，两端用称为短路环的铜(铝)环连接。

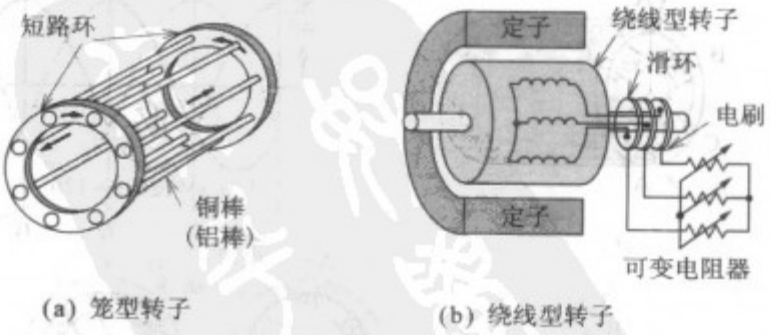


图 7.54　笼型转子与绕线型转子

图 7.54(b)是绕线型转子，把转子绕组与定子同样连成三相，再经过滑环和电刷连接到外部的可变电阻器。

11　三相感应电动机的性质

要　点

由于三相感应电动机与变压器类似，与变压器同样用等效电路分析很方便。与变压器不同的地方是感应电动势和频率与转速有关，是变化的。这一点关系到电动机的所有特性。

解　释

相对转速与转差率、转速

感应电动机是因旋转磁场切割转子导体而旋转的，所以转子的转速总是比**同步转速**稍慢。同步转速 N_s 与转速 N 之差（N_s-N）叫**相对转速**，相对转速与同步转速之比叫**转差率**。转差率 s 用式(7.3)表示（单位是小数或%），即

同步转速
相对转速
转差率

$$s=\frac{N_s-N}{N_s}\times 100\ (\%) \tag{7.3}$$

图 7.55 表示这个关系。满载时，小型机 s 为 5%～10%，大型机 s 为 3%～5%。由式(7.3)得出**转速** N(r/min)是

转速

$$N=N_s(1-s)$$

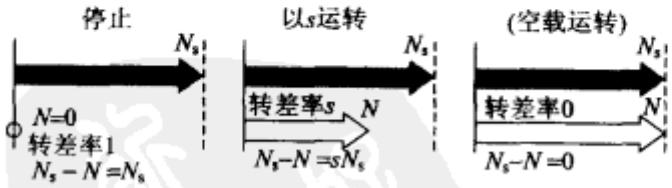


图 7.55　相对速度与转差率

副边(转子边)的等效电路及副边电流

副边感应电动势
副边频率

因**副边感应电动势**与相对转速成正比，可以用 s 表示运行中的副边感应电动势 E_{2s}(V)与**副边频率** f_2(Hz)：

$$E_{2s}=sE_2$$

$$f_2=sf_1$$

式中，E_2 是停止时的副边感应电动势，f_1 表示原边相电压 V_1 的频率。副边漏抗 x_2 与 f_2 成正比，即是 sx_2。

图 7.56 是停止时($s=1$)副边的等效电路，图 7.57 是运行(转差率为 s)时副边一相的等效电路。

由图 7.57 得出副边电流 $I_2(A)$与副边功率因数 $\cos\theta_2$：

$$I_2=\frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2+(sx_2)^2}}=\frac{E_2}{\sqrt{(r_2/s)^2+x_2^2}}$$

$$\cos\theta_2=\frac{r_2}{\sqrt{r_2^2+(sx_2)^2}}$$

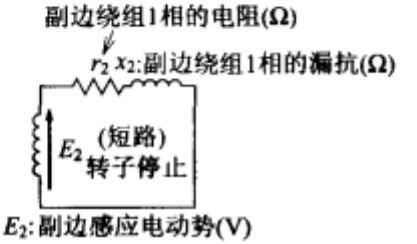


图 7.56　副边等效电路

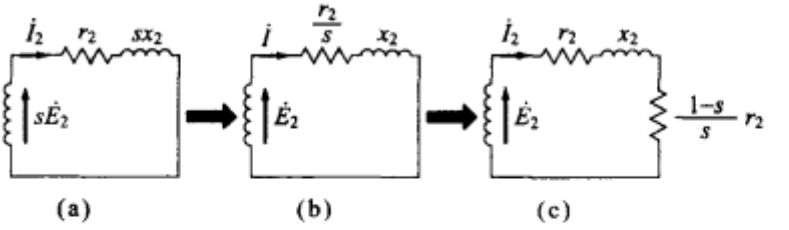


图 7.57　转差率 s 的副边等效电路

为了求出感应电动机的特性，使用以相电压 U_1 表示的简化等效电路。这是把励磁电路移到电源一边，把副边折算到原边，示于图 7.58。

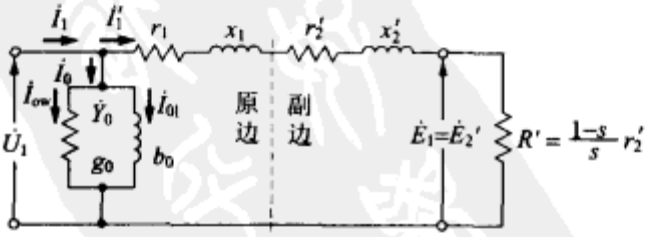


图 7.58　简化等效电路

图 7.58 中各符号表示如下：

$\dot{I}_1$：原边电流　　$\dot{I}_1'$：原边负载电流

$\dot{I}_0$：励磁电流　　$\dot{I}_{ow}$：铁损电流

$\dot{I}_{01}$：磁化电流　　Y_0：励磁导纳

g_0：励磁电导　　b_0：励磁电纳

x_1、x'_2：原边、副边漏抗　　R'：等效输出电阻

r_1、r'_2：原边、副边绕组电阻

例　题

[1] 使用频率为60Hz的6极三相感应电动机以转速为1140r/min运行时的转差率是百分之多少？

(1) 2.6　(2) 3.2　(3) 5.0　(4) 5.3

【解说】 设同步转速为 N_s(r/min)，频率为 f(Hz)，极数是 p，则转差率 s(%)是：

$$N_s=\frac{120}{p}f=\frac{120}{6}\times 60=1200$$

$$s=\frac{N_s-N}{N_s}\times 100\%=\frac{1200-1140}{1200}\times 100\%=5\%$$

答　(3)

[2] 额定频率是50Hz，12极的三相感应电动机以475r/min在运行，若停止(电动机堵转)时的副边感应电动势为200V，求出运行时的副边感应电动势及副边频率。

【解说】 设同步转速为 N_s(r/min)，转差率为 s，则

$$N_s=120\times 50/12=500$$

$$s=(500-475)/500=0.05$$

因此，副边感应电动势 E_{2s}(V)及副边频率 f_2(Hz)是：

$$E_{2s}=sE_2=0.05\times 200=10$$

$$f_2=sf_1=0.05\times 50=2.5$$

答　副边感应电动势为10V，副边频率为2.5Hz。

12　三相感应电动机的特性

要　点

从简化等效电路导出感应电动机必要的诸特性。用功率流向图来表示输入、输出和损耗的关系就容易理解。此外，任意的输出（输出特性）或转差率（转速特性）的特性都可以从圆图求出。

解　释

三相感应电动机的输入、输出、损耗及转矩

图 7.59 示出感应电动机的功率流向图（输入、输出、损耗的关系）。

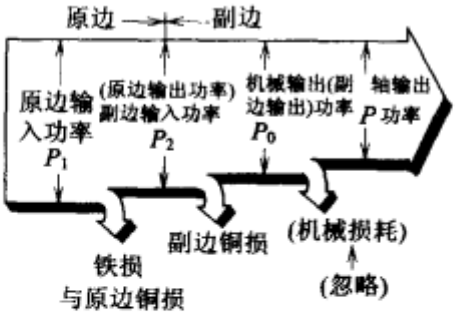


图 7.59　功率流向图

根据图 7.58 与图 7.55 可用下式表示诸特性（电压的单位是 V，电流是 A，功率是 W）：

原边输入功率 $P_i = V_1 I_1 \cos\theta_1$

其中，$\cos\theta_1$ 是原边功率因数。

原边铁损 $P_i = V_1 I_{ow} = V_1^2 g$

原边铜损 $P_{c1} = I_1'^2 r_1$

副边输入功率 $P_2 = P_1 (P_i + P_{c1}) = I_1'^2 r'_2 / s$

副边铜损 $P_{c2} = I_1'^2 r'_2 = s P_2$

机械输出（副边输出）功率

$$P_0 = P_2 - P_{c2} = P_2 - sP_2 = P_2(1-s)$$

副边效率（转子效率）$\eta_2 = \dfrac{P_0}{P_2} = \dfrac{P_2(1-s)}{P_2} = 1-s$

效率 $\eta = \dfrac{P_0}{P_1}$

若设电动机的角速度为 ω(rad/s)，转矩是 T(N·m)，则可用输出功率 P_0 表示转矩如下：

$$P_0=\omega T=2\pi\frac{N}{60}T$$

$$T=\frac{60P_0}{2\pi N}$$

此外，由于 $P_0=P_2(1-s)$ 与 $N=N_s(1-s)$，故转矩 T(N·m)为：

$$T=\frac{60P_2(1-s)}{2\pi N_s(1-s)}=\frac{60}{2\pi N_s}P_2$$

即转矩可用副边输入功率表示。将此副边输入功率称为同步瓦特。

同步瓦特

圆　图

圆图是利用原边负载电流的相量图轨迹可以用半圆描绘的性质，用空载试验、堵转试验及原边绕组电阻测定的结果作的图。图 7.60 表示利用圆图对诸特性的计算方法。

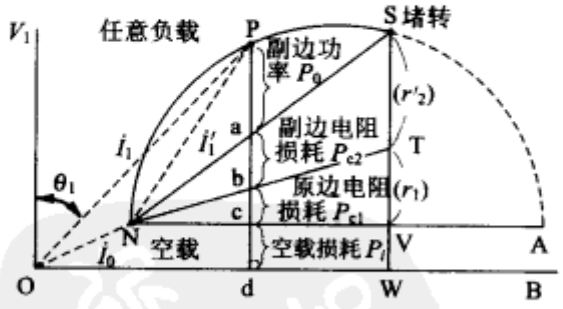


图 7.60　圆图的用法

以任意负载时原边电流 I_1($\overline{OP}$)的有功分量($\overline{Pd}$)来表示原边输入功率 P_1，则可分为各种损耗与输出功率。因为是预先确定 1A 的长度作的图，从线段的长度可以换算出 I_1 及 I'_1。另外，如先用有效电流的长度求出 1kW 的功率(功率刻度)，测量线段的长度即可求出以 kW 表示的 P_1、P_0、P_i、P_{c1}、P_{c2}。

转差率用 $P_{c2}/P_2=\overline{ab}/\overline{Pb}$求出，效率 η 用 $P_0/P_1=\overline{Pa}/\overline{Pd}$求出，功率因数 $\cos\theta_1$ 用$\overline{Pd}/\overline{OP}$求出。转矩(同步瓦特)用 P_2 求出。

13　三相感应电动机的运行

要　点

感应电动机的缺点是启动电流大转矩小。绕线型电动机的副边电阻是可以改变的，利用比例推移的性质能进行启动和速度控制。对于笼型电动机则必须改变原边的各物理量，用不同方法分别进行启动与调速。

解　释

绕线型的比例推移及启动方法

由副边的输入功率 P_2 及副边电流 I_2，可以用下式表示转矩

$$T=\frac{60}{2\pi Ns}I_2^2(r_2/s)=\frac{60}{2\pi Ns}E_2^2\frac{r_2/s}{(r_2/s)^2+x_2^2} \qquad (7.4)$$

在式(7.4)中，E_2 为一定时，如果 r_2/s 不变，T 就不变化。若把 r_2 乘以 m 倍，与前述同值的转矩将在 ms 的点发生。这叫做转矩的**比例推移**。此外，电流也可比例推移，式(7.5)表示这个关系：

比例推移

$$\frac{r_2}{s}=\frac{mr_2}{ms} \qquad (7.5)$$

在图 7.54(b)中，外部连接的可变电阻器可作启动电阻用，以减少启动电流增加转矩。运行时要将滑环短接。

图 7.61 表示用启动电阻器时转矩与电流的比例推移，

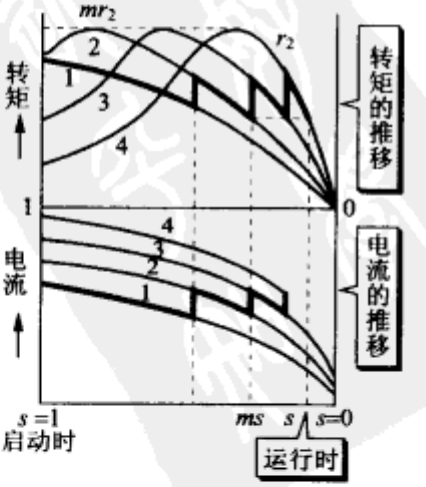


图 7.61　转矩与电流的比例推移

副边电阻法

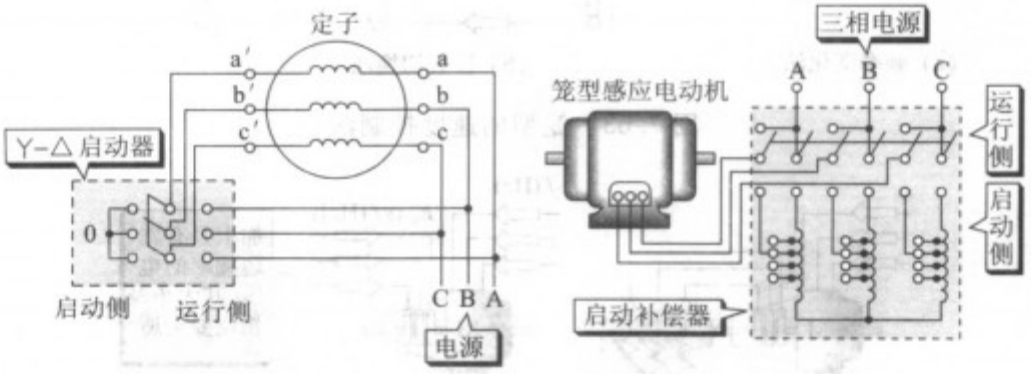
把它用在调速时叫做**副边电阻法**。此法虽能改善启动特性，但增加副边的电阻损耗使运行特性变坏。

笼型启动法

全电压启动法
Y-△启动法
启动补偿器法

小型电机用全电压启动(**全电压启动法**)，容量大时用**Y-△启动法**或**启动补偿器法**。这些方法都是降低端电压以减小启动电流，然后到运行状态时切换到全电压。由于启动时的转矩与电压的2次方成正比，故转矩变小是其缺点。

用Y-△启动的启动电流和转矩都是全电压启动的1/3；用补偿器启动时是按$1/m$抽头，启动电流和转矩都按$(1/m)^2$减少。图7.62表示Y-△启动法和启动补偿器法的接线。



(a)　Y-△启动法　　(b) 启动补偿器法

图7.62　笼型感应电动机的启动法

感应电动机的调速

要改变电动机的转速N时，因

$$N=N_s(1-s)=\frac{120}{p}f(1-s)$$

所以需要改变电源的频率f或定子绕组的极数p，或改变转差率s。

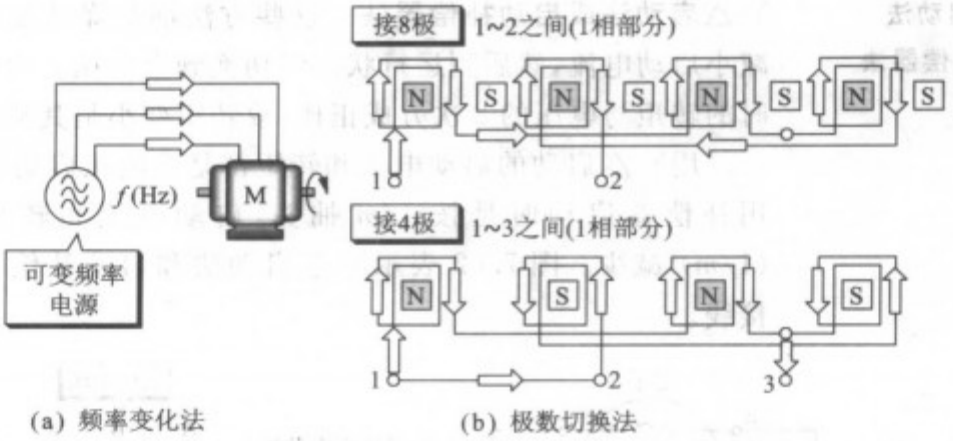
副边电阻法
副边励磁法
变频法
极数切换法

笼型电动机采用变极数或变频率的方法，图7.63是其原理。此外，对于绕线型电动机采用改变转差率s的方法，有前述的**副边电阻法**和**副边励磁法**。图7.64是其原理。**变频法**采用晶闸管变频电源(逆变器方式)，可以很平滑地在宽范围内调速。**极数切换法**就是有级多速电动机。副边励磁

法是从外部把励磁电压 E_c 加到绕线型电动机的副边电路，是改变转差率 s 的方法，可在同步转速的上下大范围控制。

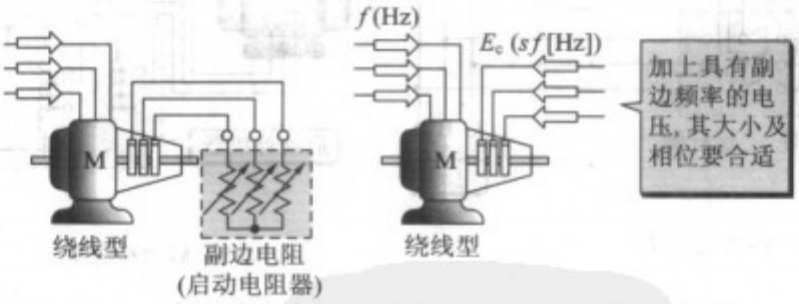
克莱玛方式　**谢尔比乌斯方式**

励磁方法中有**克莱玛方式**及把副边的输出反馈给电源的**谢尔比乌斯方式**。



(a) 频率变化法　　(b) 极数切换法

图 7.63　笼型的速度控制法



(a) 副边电阻法　　(b) 副边励磁法

图 7.64　绕线型的速度控制法

14　什么是单相感应电动机

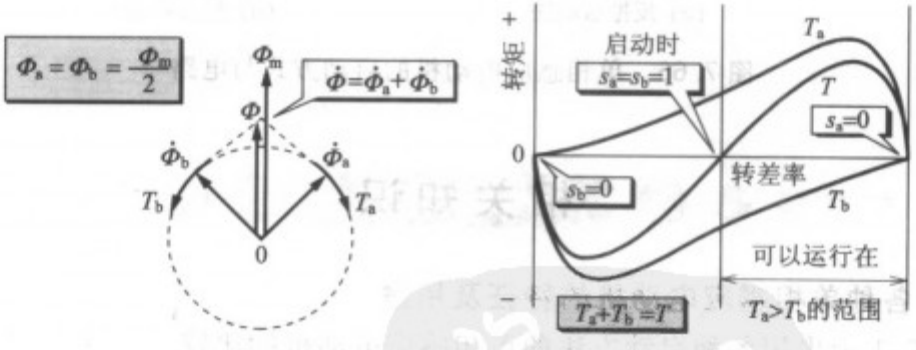
要　点

单相感应电动机的转子绕组是笼型，定子绕组是单相。单相绕组产生的磁场是脉动磁场，启动转矩为零，最初将转矩加到哪个方向就向哪个方向旋转。按这个启动转矩的给予方式（启动方式）可有各种单相感应电动机。

解　释

单相感应电动机的旋转原理

图 7.65 表示，脉动磁场可以分解为两个方向相反，以同步转速旋转的磁通 Φ_a 和 Φ_b，其大小等于脉动磁场最大磁通的 1/2。在转子上，由 Φ_a 产生的转矩 T_a 和由 Φ_b 产生的转矩 T_b 在起作用，合成转矩为 T。所以，如果在右方向用某种方法给予转矩，就变成 $T_a > T_b$，就能持续向右旋转。



(a) 脉动磁场的分解　　(b) 转矩-速度特性

图 7.65　单相感应电动机的旋转原理

单相感应电动机的种类

分相启动型　**分相启动型**具有 M、A 两个绕组，其电流产生二相椭圆旋转磁场从而得到转矩。**电容启动型**用电容 C_a 产生二相椭圆旋转磁场，启动特性好。同类型的有电容马达。**反推启动型**的定子上只有主绕组，转子具有整流子，启动时作为反推电动机启动，可得到大转矩。**短路环型**是把定子的一部分作成凸极，将短路环套在上面来产生移动磁场以得到转矩，但在构造上不能改变旋转方向。图 7.66 是各种启动方法的电路。

电容启动型

反推启动型

短路环型

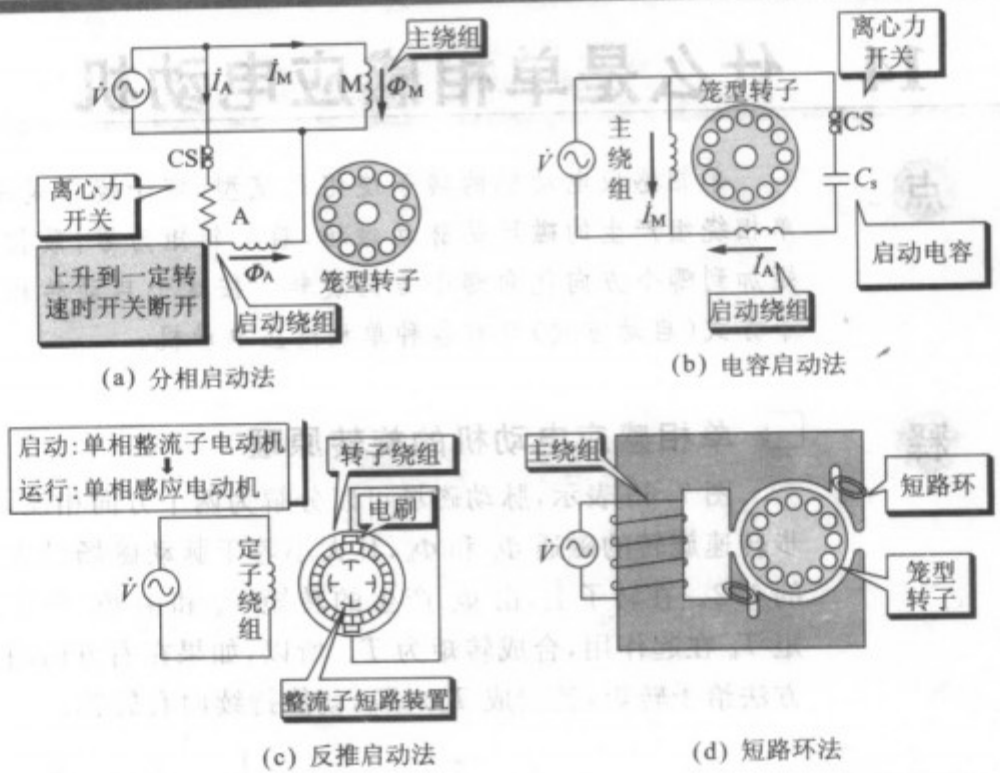


图 7.66 单相感应电动机的启动方式与电路

相关知识

◆ 各种单相感应电动机的特征及用途

表 7.1 示出用各种启动方法的单相感应电动机的比较。

表 7.1 单相感应电动机的启动方法比较

种 类	特 征	用 途
分相启动单相感应电动机	启动转矩、启动电流大,价廉	缝纫机,球盘,浅井泵,办公机器台扇(200W 以下)
电容启动单相感应电动机	启动转矩大,启动电流小,价格中等	泵,压缩机,冷冻机,输送机,机床(400W 以下)
电容马达	启动转矩小,启动电流小,不需离心开关,效率好,价格中等	电扇,洗衣机,办公机器,机床(200W 以下)
电容启动电容马达	电容启动电容马达要另备启动电容,转矩大	泵,压缩机,冷冻机,机床(200W 以下)
反推启动单相感应电动机	启动转矩特大,启动电流小,价高	泵,压缩机,冷冻机,机床(100～800W 左右)
短路环型单相感应电动机	启动转矩小,效率低,构造简单,坚固价廉	电扇,录音机(10W 以下)

15 其他感应电机

要 点

特殊笼型感应电动机是具备了笼型感应电动机和绕线型感应电动机的优点的电动机。

感应电压调整器是应用感应电动机原理的静止电机，使定子绕组与转子绕组之间具有变压器的功能。

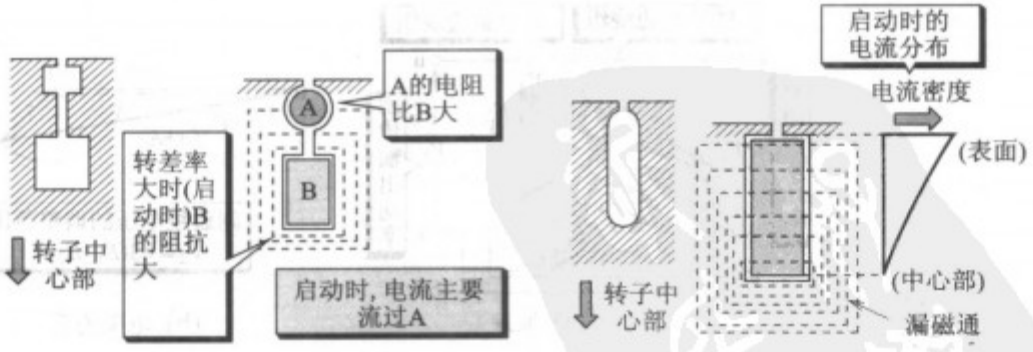
解 释

特殊笼型感应电动机

按笼型转子槽的构造可分为双笼型和深槽型两类。

双笼型如图 7.67(a)所示，转子安放两层导体，外层导体的电阻比内层大。还有，外层的漏抗也远比内层大。当启动时副边频率高，电流流过 A 层，启动电流小启动转矩大；运行时转差率 s 变小，电抗也变小，电流流过 B 层使运转特性变好。

深槽型示于图 7.67(b)，配置细长形的导体，利用启动时漏抗偏移引起电流密度的偏移，用大电阻状态启动以增加启动转矩。在运行时电流分布均匀，运转特性好。



(a) 双笼型转子槽　　(b) 深槽笼型转子槽

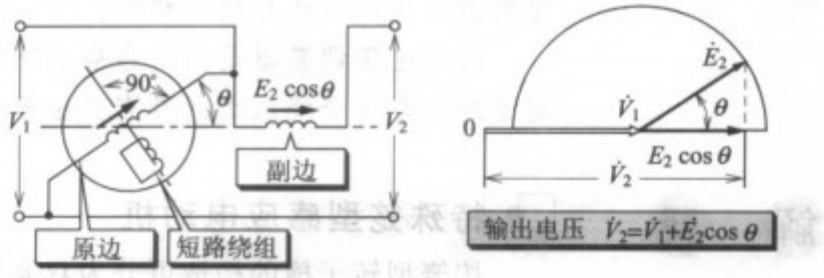
图 7.67　特殊笼型感应电动机转子槽的构造

感应电压调整器

单相感应电压调整器

单相感应电压调整器的原理与单绕组变压器相同。转子上的分路绕组相当于原边绕组；定子上的串联绕组相当于副边绕组。

图 7.68 表示，设两绕组中心轴的夹角是 θ，两者的互感与 $\cos\theta$ 成正比例变化，输出电压可以用图 7.68(b)的关系表示。在 $\theta=180°$处副边感应电动势为 E_2，对于 $\theta=0\sim180°$的转角，输出电压 V_2 可用 $V_2=V_1\pm E_2$ 表示。



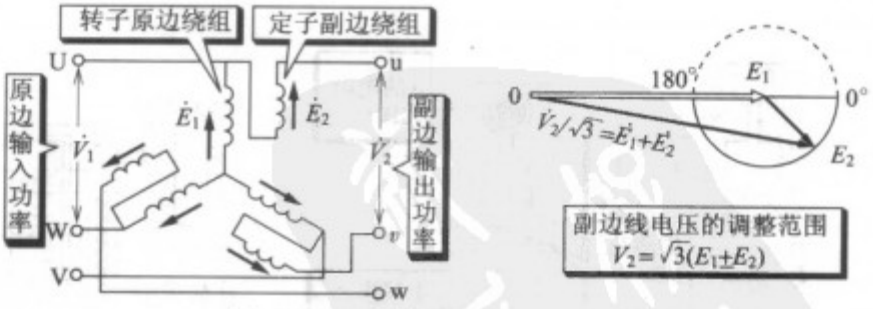
(a) 原理　　(b) 电压关系

图 7.68　单相感应电压调整器的原理及电压调整

在副边负载电流的磁通中，由于 $\sin\theta$ 分量不能用原边负载电流抵消，会产生漏抗导致电压降低，所以为抵消此分量要设置短路绕组。

三相感应电压调整器

三相感应电压调整器可以认为是转子被固定住的绕线型感应电动机，因定子产生旋转磁场，所以需设置蜗轮紧固转子使其不能旋转。其原理及电压调整范围示于图 7.69。



(a) 原理　　(b) 电压关系

图 7.69　三相感应电压调整器的原理与电压调整范围

相关知识

◆ 笼型的优点和绕线型的优点

笼型的优点有：①构造简单坚固；②使用方便；③价廉；④故障少。

绕线型的优点有：①启动特性好；②调速容易。

◆ 基于逆变器的感应电动机的速度控制

由于直流电动机其速度易于控制且初始转矩大，因此以前广泛应用于电梯等领域。然而，感应电动机的特点是故障少、价格低廉，缺点是不易于速度控制。但是，现在随着基于半导体的电力电子技术的发达，可以自由改变交流电源的频率、电压的逆变器技术的出现，感应电动机等的速度控制变得容易，而及时使用。

使用逆变器的感应电动机，不仅在电气化铁道、大厦空调、电梯、产业用电机等，而且在家庭用空调、洗衣机、办公设备等领域广泛使用，是现在不可缺少的器件。

16 什么是同步电机

要 点

转子是永磁铁或直流电磁铁制成，与旋转磁场以相同速度旋转的电机叫同步电机，其转速叫同步转速。现在使用的交流发电机是以同步转速旋转的同步发电机。

解 释

同步电机的原理

如果极数是 p，频率是 f(Hz)，同步转速 n_s 可用式(7.6)表示，即

$$n_s=\frac{120f}{p}\ (\text{r/min}) \tag{7.6}$$

若匝数是 w，频率是 f(Hz)，磁通最大值是 Φ_m(Wb)，则同步发电机感应电动势的大小是

$$E=4.44fw\Phi_m\ (\text{V}) \tag{7.7}$$

感应电动势的波形示于图 7.70，是与磁通密度 B(T)的变化成正比的正弦波。

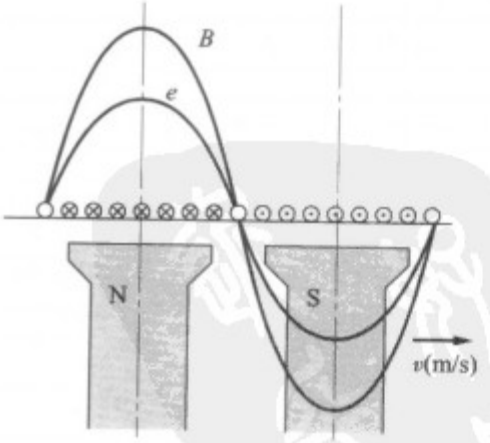


图 7.70 感应电动势的波形

同步发电机最近多使用半导体整流器把交流整流后作为励磁的方式。无刷发电机是利用安置在转轴的硅整流器将交流变成直流，作为励磁电流使用。自励式交流发电机与自励式直流发电机的励磁方式相同，是把发电机的一部分交流电流整流后，当作励磁电流使用。

电枢反应

给发电机接上负载，电枢绕组内流过三相交流电，即产生旋转磁通，同时有电枢反应。随着负载的功率因数不同，有以下反应。

交叉磁化反应（横轴反应） 功率因数为 1 时，示于图 7.71。在磁极的右侧（旋转方向侧）磁场的磁通减弱，在左侧磁场的磁通加强，气隙的磁通分布发生偏斜。

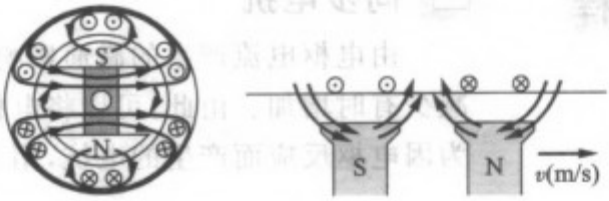


图 7.71 交差磁化作用

减磁反应（纵轴反应） 滞后功率因数为 0 时，如图 7.72 所示。磁极的磁场磁通减弱，气隙磁通减少，感应电动势也减少。



图 7.72 减磁作用

增磁反应或磁化反应（纵轴反应） 导前功率因数为 0 时，示于图 7.73。磁极的磁场磁通加强，使气隙磁通增加，感应电动势也增加。

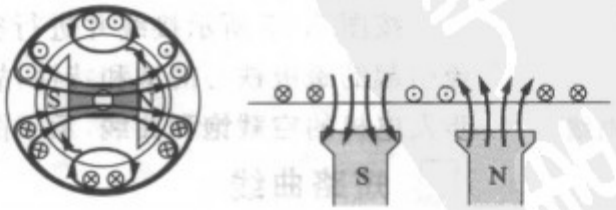


图 7.73 增磁作用或磁化作用

17　同步发电机的特性

要　点

电枢反应可用同步电抗表示。短路比与百分率同步阻抗是倒数关系，是作为表示同步发电机的构造或电压调整率的指标使用的。

解　释

同步电抗

电抗

由电枢电流产生的磁通影响主磁通，使感应电动势有时减少有时增加。由此，可以将电枢反应用**电抗**代替。把这称为因电枢反应而产生的电抗，用 $x_a(\Omega)$ 表示。

漏磁通

漏抗

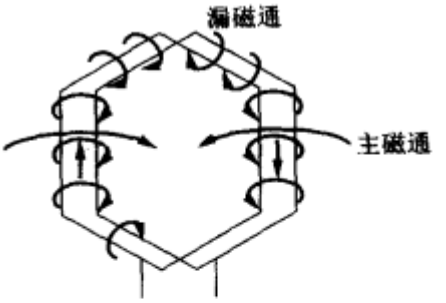


图 7.74　漏磁通

在由电枢电流产生的磁通中，如图 7.74 所示，也有只与电枢电流铰链，并不影响主磁通的磁通，叫做**漏磁通**。漏磁通的效果也可用电抗代替。称其为**漏抗**，以 $x_l(\Omega)$ 表示。

同步电抗

由电枢反应产生的电抗与漏抗合成的电抗叫**同步电抗**，用 $x_s(\Omega)$ 表示。

同步阻抗

同步阻抗

电枢绕组的电阻 $r_a(\Omega)$ 与同步电抗 $x_s(\Omega)$ 的矢量和叫做**同步阻抗**。

空载饱和曲线

空载饱和曲线

按图 7.75 所示接线并进行空载实验时，由于有磁场电流引起的磁极铁心的**饱和特性**，故端电压也饱和。这叫做同步发电机的**空载饱和曲线**，示于图 7.76。

短路曲线

短路曲线

图 7.77 表示把同步发电机的端子短路进行三相短路实验。由于电枢反应磁通不饱和，磁场电流与电枢短路电流成正比关系，示于图 7.78。这叫**短路曲线**。

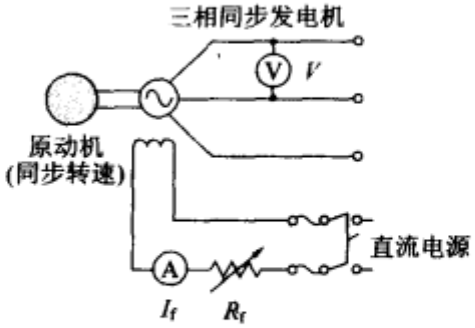


图 7.75　空载试验

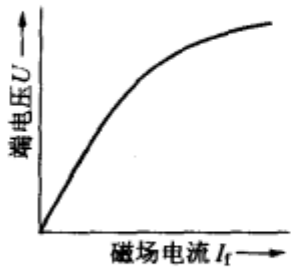


图 7.76　空载饱和曲线

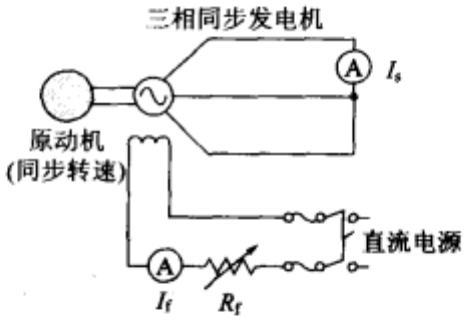


图 7.77　三相短路试验

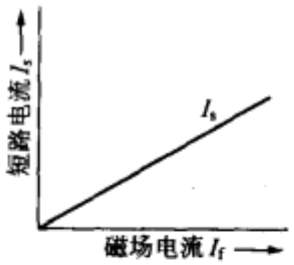


图 7.78　短路曲线

同步阻抗、百分率同步阻抗、短路比的计算

这些值可由空载饱和曲线及短路曲线求得，示于图 7.79。

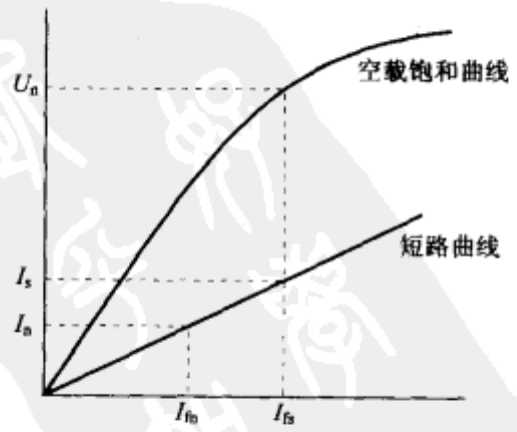


图 7.79　同步阻抗、百分率同步阻抗、短路比的计算

同步阻抗

同步阻抗 $Z_s(\Omega)$可用端电压除以短路电流求出，但须把端电压换成相电压，即乘以 $1/\sqrt{3}$倍，如下式所示：

$$Z_s=\frac{\frac{1}{\sqrt{3}}V_n}{I_s}=\frac{V_n}{\sqrt{3}I_s}\ (\Omega) \tag{7.8}$$

百分率同步阻抗

百分率同步阻抗$\%Z_s$是表示流过额定电流时同步阻抗的电压降与额定相电压之比，用式(7.9)表示，即

$$\%Z_s=\frac{I_nZ_s}{\frac{1}{\sqrt{3}}V_n}\times 100=\frac{I_n}{I_s}\times 100\ (\%) \tag{7.9}$$

短路比

短路比 S 表示额定电压时的短路电流与额定电流之比，示于式(7.10)，即

$$S=\frac{I_s}{I_n}=\frac{I_{fs}}{I_{fn}}=\frac{100}{\%Z_s} \tag{7.10}$$

例　题

1 图7.79是 $I_{fn}=100\text{A}$，$I_{fs}=130\text{A}$，$V_n=6000\text{V}$ 的三相同步发电机的特性。求在 $I_n=400\text{A}$ 时的短路比 S、百分率同步阻抗 $\%Z_s$ 及同步阻抗 Z_s。

答

$$S=\frac{I_{fs}}{I_{fn}}=\frac{130}{100}=1.3$$

$$\%Z_s=\frac{100}{s}=\frac{100}{1.3}=76.9\%$$

$$I_s=s\times I_n=1.3\times 400=520\ (\text{A})$$

$$Z_s=\frac{V_n}{\sqrt{3}I_s}=\frac{6000}{\sqrt{3}\times 520}=6.66\ (\Omega)$$

18　同步发电机的运行

要　点

如果负载很重，用一台同步发电机发电容量不够时，将2台以上的同步发电机并联接到同一母线，叫做并网运行。

解　释

同步发电机在并网运行时，为了使分担的负载与各发电机的额定容量成正比，必须用原动机对各种必要条件进行调整：

① 各发电机的感应电动势的大小必须相等。为此，要增、减发电机的磁场电阻，调整磁极的励磁，使电动势大小相等。

② 各发电机的感应电动势的相位必须要一致。为此，要调整原动机的转速以取得同步。

③ 各发电机的感应电动势的频率必须相等，为此，要调整原动机的转速使频率相等。

无功循环电流(无功环流)

无功环流

各发电机的感应电动势的大小不相等时，因电势差在发电机之间会流过循环电流。此循环电流受同步阻抗(回路的主要性质是感抗)之和的限制，是没有用的电流，叫**无功环流**。无功环流会成为电枢电流，产生电枢反应。对于大电动势发电的发电机是滞后电流，起到减磁作用；对于小电动势发电的发电机是超前电流，起到增磁作用。所以端电压逐渐相等。图7.80表示2台同步发电机的并网运行，图7.81表示 E_1 大时相量图。

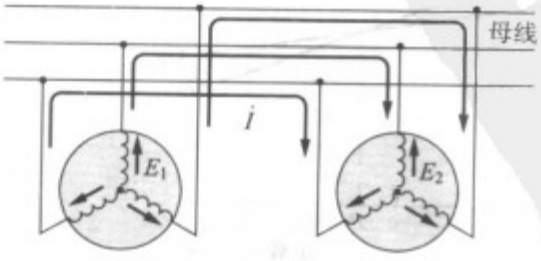


图7.80　同步发电机的并网运行

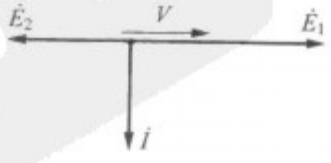


图7.81　E_1 大时的相量图

同步检测装置

同步发电机能够并网运行的条件之一是频率与相位必须一致。为了测定这一点使用同步检测器。如果像图 7.82 那样接线，从图 7.83 的相量图可看出，当 L_1 灭，L_2 与 L_3 的亮度相同时就是取得了同步。

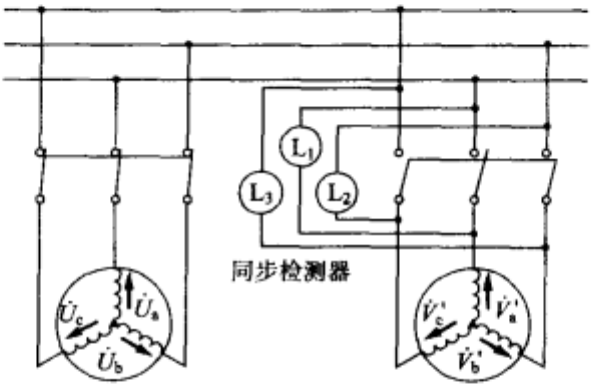


图 7.82　同步检测器的接线

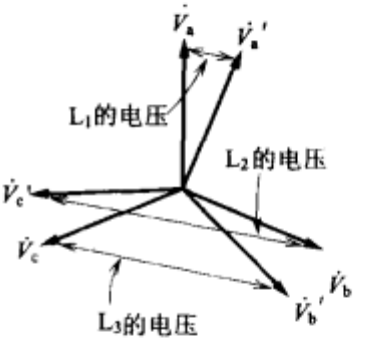


图 7.83　L_1，L_2，L_3 的电压

并网运行的原动机的条件

在同步发电机的并网运行中，原动机也是重要的条件：

① 即使并网运行的各发电机的转速相同，角速度有些差异也会因瞬间产生相位差或感应电动势的大小不同而失去同步。所以转速要相等，角速度要始终一致。

② 在并网运行中如果有一台过载，必须使其他同步发电机来分担。但如果原动机的速度特性不同，就不能分担与同步发电机的容量相适应的负载。若并网运行的同步发电机的速度特性有如图 7.84 所示的差异，过载时会形成

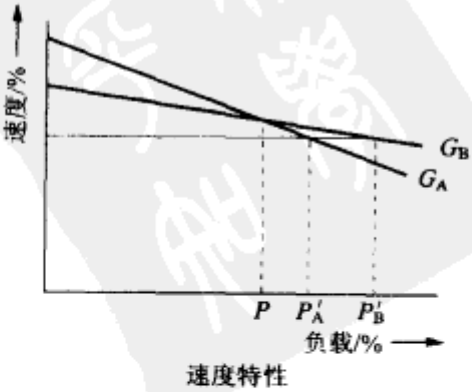


图 7.84　速度特性不同的情况

G_A 分担 P'_A(%)的轻负载，G_B 分担 P'_B(%)的过重负载。而且轻载时就会分担其相反的负载。为此，速度特性一致就成为能够并网运行的条件。

速度整定率

速度整定率

把空载时的转速 N_0(r/min)和满载时的转速 N_n(r/min)之差与空载转速之比叫**速度整定率**，以下式表示：

$$\beta=\frac{N_0-N_n}{N_0}\times 100\ (\%)$$

在同步发电机的原动机上附有将速度整定率在2%～6%范围内调整的调速机，使负载的分担稳定。

振荡与稳定度

同步发电机的负载变动时，原动机的转速会发生变化。但是因为转子有惯性，在适应负载变化时会因增、减过度而产生振动。这种振动通常是衰减的。

但调速机有时过于灵敏，当负载周期变化时，会发生因惯性产生的振动及共振现象，有时是非常剧烈的振动，这种现象叫**振荡**。

振荡

为了防止振荡，应设置制动绕组，使调速机的动作稍许迟缓以不发生共振。在加上负载时不发生振荡，能稳定运行的程度叫**稳定度**。

稳定度

如果振荡进一步加剧，与电源不同步，电动机就停止，这种现象称为**失步**。

失步

19 同步电动机的特性

要 点

同步电动机与同步发电机的构造基本相同。具有功率因数及效率好，电枢与转子的气隙长度可以较大等特征，用于大容量机或要求速度恒定的场合。求磁同步电动机与逆变器结合，作为高效率可变速机广泛使用。

解 释

功率与转矩

三相同步电动机的定子装有产生旋转磁场的三相绕组，为防止高次谐波，与发电机一样采用Y形接法。转子具有与磁场绕组极数相同的直流磁极，通过滑环以直流电流励磁。

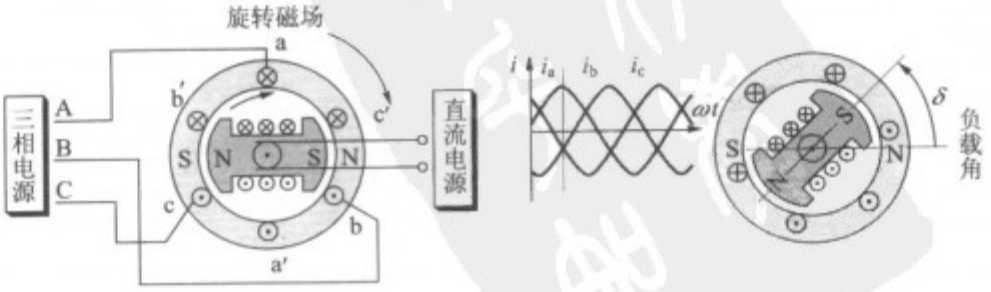
制动绕组

在磁极面上设置笼型短路绕组，称为**制动绕组**。当负载转矩变化使负载角改变时，流过感应电流产生制动力以防止振荡。另外在自启动时因笼型感应电动机的原理产生转矩，担任**启动绕组**的作用。也有转子铁心中埋入永磁，利用逆变器运行的**永磁转子**。

启动绕组

永磁转子

图7.85示出转子与电枢产生的旋转磁场同步旋转。图7.85(a)是空载状态，由电枢磁场与转子磁场的关系可知在转子上不产生转矩。加上负载转矩时如图7.85(b)所示，转子相位滞后，负载角δ旋转而产生转矩，随着负载的增加，负载角也增加。



(a) 空载　　(b) 转矩的发生

图7.85 同步电动机的原理

图7.87表示与图7.86中三相同步电动机的一相的等

效电路相应的负载角为 δ 时的相量图。

根据图 7.87 的相量图，一相功率与电压的关系可由下式求得：

$$P=EI\cos(\delta-\theta)\ (\mathrm{W})$$

$$x_s I\cos(\delta-\theta)=V\sin\delta$$

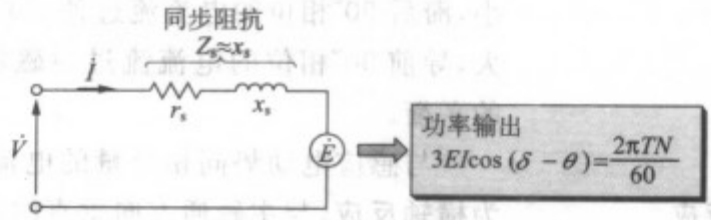


图 7.86　等效电路

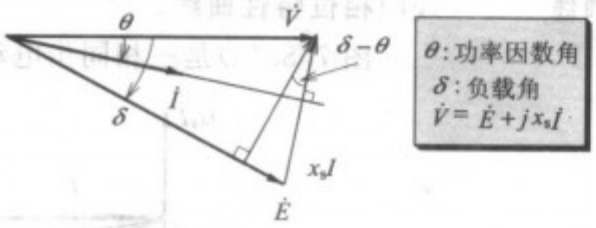


图 7.87　相量图

将其归纳为式(7.11)，就与同步发电机的输出功率或长距离输电线路的输电功率的公式相同，即

$$P=EI\cos(\delta-\theta)=\frac{VE\sin\delta}{x_s}\ (\mathrm{W}) \qquad (7.11)$$

旋转机械的功率 P(W)与转速 N(r/min)，转矩 T(N·m)的关系示于式(7.12)，即

$$P=\omega T=\frac{2\pi N}{60}T\ (\mathrm{W}) \qquad (7.12)$$

同步电动机的转速等于同步转速，是一定的。所以转矩 T 与功率 P 成正比。由式(7.11)、式(7.12)可知，同步电动机当负载角为 90°时产生最大转矩，如果负载超过这个界限就会脱离同步，电动机停止。把不脱离同步界限的转矩叫**拉出转矩**，负载角 δ 是在 50°～70° 的范围。即使负载一定，由于电压降低，磁场电流减弱使内部电动势降低时，负载角也会增加，容易导致**拉出同步**。

拉出转矩

拉出同步

V 形曲线(相位特性曲线)

同步电动机和同步发电机一样,电枢动绕组的电流都会引起电枢反应。但不同的是电动机中电流方向与感应电动势的方向相反,滞后 90° 相位的电流产生磁化作用;导前 90°的电流产生减磁作用,这叫做**纵轴反应**。如果磁场电流小,滞后 90°相位的电流流过使磁场磁通增加;若磁场电流大,导前 90°相位的电流流过使磁场磁通减少以保持电压的平衡。

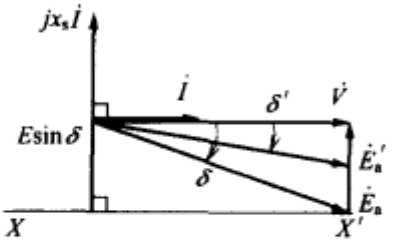
纵轴反应

与感应电动势同相分量的电流产生交叉磁化作用,称为**横轴反应**(与主磁通方向垂直的反应)。同步电动机的端电压及负载为一定时,表示磁场电流与电枢电流关系的曲线叫**相位特性曲线**。

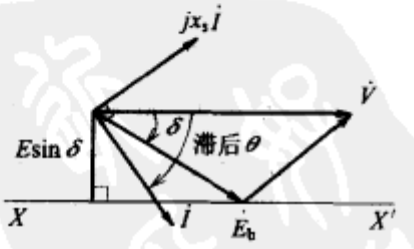
横轴反应

相位特性曲线

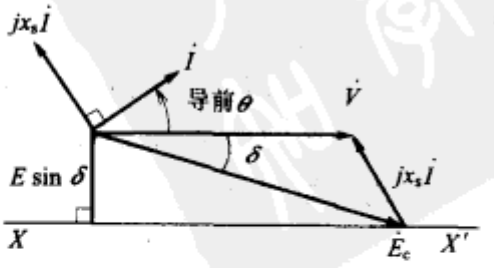
图 7.88(a)是三相同步电动机以功率因数为 1 运行时



(a) 功率因数为1时



(b) 磁场电流减少



(c) 磁场电流增加

图 7.88　相位特性的相量图

的相量图。当负载增加时，设功率因数为1，由图可清楚地看出端电压 $V<E_a'<E_a$ 并且保持功率因数为1的磁场电流也随负载有少许增加。

如果供给的电压和功率 P 为一定，由式(7.11)知道 $E\sin\delta$ 也是一定。所以因磁场电流 I_f 的变化而增、减的感应电动势 E 的相量在 XX' 线上移动。使磁场电流变化时的相量图是图7.88(b)、(c)。由图7.88(b)可知，磁场电流减少后，感应电动势减少变为 E_b，负载角则增加为 δ_b，因负载电流的相位滞后，电流增加为 I_b。如果磁场电流增加，如图7.88(c)所示，感应电动势增大为 E_c，负载角减少为 δ_c，因负载电流的相位超前，电流增加为 I_c。

图7.89是表示把负载的大小作为参数(媒介变量)时，电枢电流相对于磁场电流的变化，就是相位特性曲线，按曲线的形状又叫**V形曲线**。

V形曲线

曲线a是空载，曲线b、c、d是负载逐渐增加的情况。V形曲线的最低点是功率因数为1的点。虚线表示负载增加时V形曲线向右移。连接功率因数1的点右侧是超前功率因数的范围，左侧是滞后功率因数的范围。

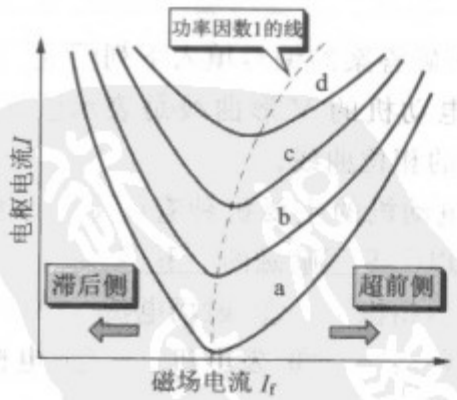


图7.89 同步电动机的V形曲线

同步调相机

同步调相机用于输电系统，如图7.90所示，与系统并联，无机械负载运行。同步调相机不仅可补偿负载的无功功率，而且能调节无功功率以保持受电电压一定。无功功率的调整用增、减磁场电流进行，能连续调节是其特征。

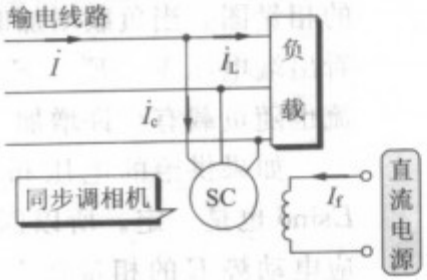


图 7.90　同步调相机的接线

此外，因同步调相机是旋转机械，有转子运动的能量授受，与功率因数能连续进行调节的同时，也有助于提高系统的稳定度。

无功功率(无功电流)的调节

作为调相设备来说，电力电容(导前电流)与分路电抗器(滞后电流)的组合比起同步调相机用得更多。无功功率(无功电流)的调节用断路器的通断来进行，但最近多用晶闸管控制通、断。用晶闸管控制响应迅速，可提高输电系统的稳定度。

例　题

[1] 选择正确答案的编号填入下列 [a] ~ [h] 的方框中。

(1) 同步电动机的 V 形曲线是表示 [a] 与 [b] 为一定时，[c] 与 [d] 的关系的相位曲线。

(2) 同步电动机的主要机种有 [e]、电动机、[f] 三种，一般这些同步电动机配备以 [g] 励磁的 [h]。

答案编号：① 调相机　② 磁场电流　③ 端电压　④ 磁场绕组
⑤ 负载　⑥ 发电机　⑦ 电枢电流　⑧ 直流

答　a—③，b—⑤，c—②，d—⑦，e—⑥，f—①，g—⑧，h—④

20　同步电动机的运行

要　点

从原理上说同步电动机没有启动转矩，需用某些方法使其加速到同步转速附近再作为同步电动机运行。在启动方法上有自启动法、启动电动机法、晶闸管启动法及同步启动法等。

解　释

自启动法

全电压启动法

自启动法是在转子的磁极面上装有制动绕组，当作笼型感应电动机空载启动的方法。以全电压启动时(**全电压启动法**)，启动转矩大但启动电流也大，对电源会有不好的影响。为了限制启动电流，使用启动补偿器、串联电抗器或启动用变压器，多用于低电压启动(**低电压启动法**)。

低电压启动法

启动补偿器

图 7.91 是使用**启动补偿器**的自启动法的电路。启动补偿器是容量比较小的单绕组变压器，其步骤如下：

① 把开关 S_2 倒向使磁场电阻短路的一侧，开关 S_1 倒向启动一侧。将全电压的 50%～70%的电压加到电枢绕组，当作感应电动机启动。

② 转速达到同步转速附近时，将 S_2 切换，用直流电源给磁场绕组励磁。由牵入转矩将转子牵入同步转速，作为同步电动机运行。

③ 将 S_1 切换到运行一侧，调节磁场电流以达到电枢电流为最小的运行状态，加上负载。

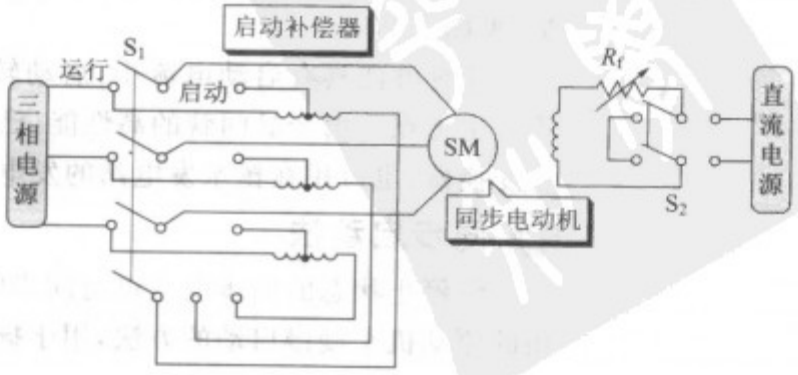


图 7.91　自启动法

启动电动机法

启动电动机法

启动电动机法是利用其他电动机将同步电动机加速到同步转速的方法，用于大容量电动机的启动。这是将启动用电动机直接与同步电动机连接，启动用电动机的额定转速要比主机的同步转速高。因此，启动用电动机使用比主机极数少的感应电动机或直流电动机(见图 7.92)。

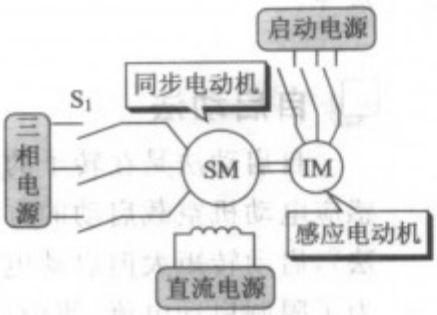


图 7.92　启动电动机法

用启动电动机启动后，在正好达到同步转速时给转子励磁，并同步投入电源运行。因为是专用的启动电动机，启动转矩或启动电流等问题都可以解决，但有制造费用高、电动机轴变长等问题。

晶闸管启动法

晶闸管启动法

晶闸管启动法是在同步电动机与电源之间接入晶闸管变换器，从低频率开始同步启动的方法。从电动机停止时开始给磁场励磁，然后相应于电动机转子磁极的位置，由可控硅变换器供给电枢电流以启动并加速。在接近额定同步转速的时刻接通电源。总之，是当作**无整流子电动机**的启动方法(见图 7.93)。

无整流子电动机

这种方法具有启动电流小，启动转矩大，运行时效率高等突出优点。由于晶闸管的高性能，已能制造大容量的晶闸管变换器，也可用在扬水发电站的发电电动机的启动。

同步启动法

将停止状态的同步发电机与同步电动机连接，利用发电用的原动机来慢慢启动的方法，用于扬水发电站。

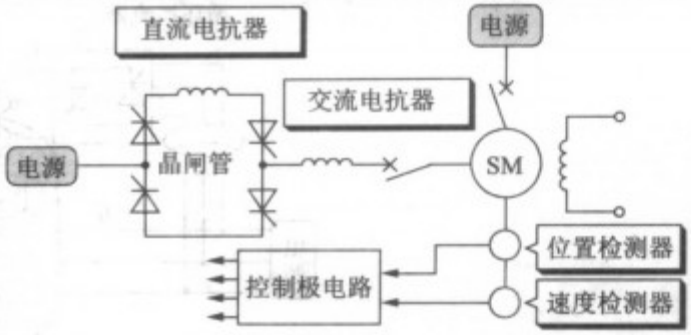


图 7.93 启动法

振 荡

同步电动机的负载急剧变化时负载角发生变化，即使想稳定在新的负载角，也会因转子的惯性使负载角发生周期性的变化，这叫做振荡。当电源电压或频率有周期性的变动时，也会由于共振而产生振荡。振荡激烈时会给电源带来坏影响，甚至与电源脱离同步导致电动机停车。为防止振荡，设置抑制负载角变动的**制动绕组**，有时也安装**飞轮**。

制动绕组

飞轮

调 速

同步电动机是与电源的频率同步旋转的**定速电动机**，要调速可以用图 7.93 所示的晶闸管变换器改变供电电压的频率以控制转速。这种情况称为**无整流子电动机**。

定速电动机

无整流子电动机

使转速在同步转速上下比较小的范围内变化时，可用图 7.94所示的二次励磁法(**超同步谢尔比乌斯方式**)。在转子的积层铁心上设有三相分布绕组，用可变频率的三相交流励磁产生旋转磁场。设电源频率是 f_1，转子的励磁频率是 f_2，电枢的旋转磁场与转子旋转磁场的相对速度是与频率 $f=f_1 \pm f_2$(与相序旋转同方向时为负，反方向时为正)对应的同步转速。转子以这个同步转速旋转。这个方法可以用小容量的可控硅变换器，控制性能优良，但转子的铁心和绕组的构造复杂。也用于扬水发电站的发电电动机上，能适合水轮泵的运行条件以良好的效率运行。

超同步谢尔比乌斯方式

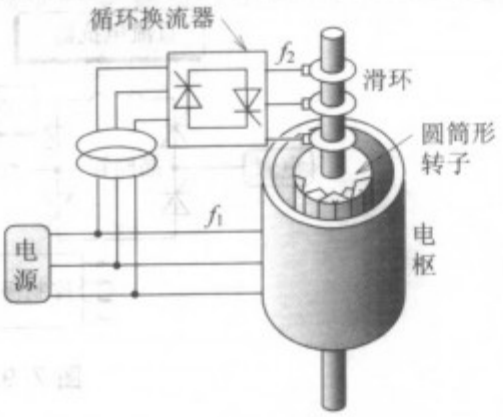


图 7.94 超同步谢尔比乌斯方式

例 题

[1] 有关同步电动机的叙述如下，哪个是错误的？

(1) 速度一定。　　(2) 可用磁场电流来调节功率因数。

(3) 没有振荡和拉出同步。　　(4) 一般启动转矩小。

(5) 气隙长度大，安装和维护容易。

答 (3)

同步电动机有发生振荡和拉出同步的危险。同步电动机的电枢与转子之间的空隙(气隙)可以做得比较大是其优点。

[2] 在下列 1 ～ 5 的方框内填入适当的词：

磁极采用铸钢或 1 整体制造，在启动时主要利用其 2 的涡流电流的转矩的同步电动机叫做 3 磁极形同步电动机。因其构造与通常的制动绕组比较 4 大而且坚固，多用于驱动负载惯性 5 的炼铁烧结用的鼓风机。

答 1—锻钢(锻造钢)　2—表面　3—块状　4—热容量　5—大

21　其他电动机的种类及用途

要　点

电动机中有代表性的是直流电动机、感应电动机、同步电动机等。在必须具有复合特性或不同的驱动电源以及用于控制等场合，可设法用其他电动机。半导体器件与电力电子学结合，可使电动机的特性或控制性能、维护性能均有改善而得到广泛应用。

解　释

交流整流子电动机

交流整流子电动机是具有一般感应电动机不具备的直流电动机的优点（如高速等）的交流电动机。有三相并励整流子电动机（**施拉盖电动机**），三相串励整流子电动机及单相串励电动机等种类，其缺点是构造复杂，整流条件恶劣，电刷或整流子的磨损大等。在高转速的吸尘器、大启动转矩的手电钻等设备使用的小型电动机，多为单相交流串励整流子电动机。

施拉盖电动机

图 7.95 是单相整流子电动机的原理。在直流串励电动机里，即使改变电源的极性，也因磁场磁通和电枢电流的方向同时相反，故旋转方向不变，可以当作交流电动机使用。因电枢和磁场都是交流磁通，所以磁场铁心也用硅钢片叠成。为改善整流条件及功率因数，可设法减少电枢绕组中一个线圈的匝数。由于这种电动机交、直流两用，也叫**通用电动机**。

通用电动机

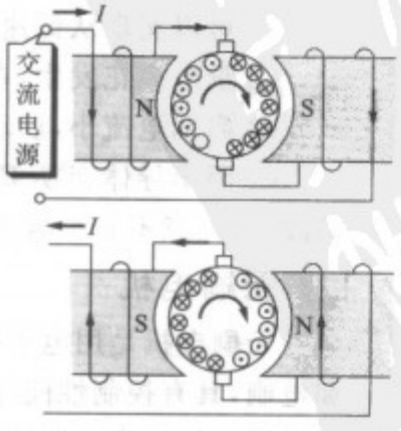


图 7.95　单相串励整流子电动机

无整流子电动机

无整流子电动机

无整流子电动机具有多相电枢绕组和直流励磁绕组的转子及转子位置检测器，用晶闸管等半导体装置与转子的位置同步进行电枢电流的切换，基本构造是同步电动机。在半导体装置中使用循环换流器，从交流电流直接变换并将驱动电流加到电动机的叫**交流式**（见图7.96）；通过逆变器从直流电源把交流加到电动机的叫**直流式**（见图7.97）。从交流电源用变换器变成直流，再通过逆变换器驱动的也叫直流式。

交流式

直流式

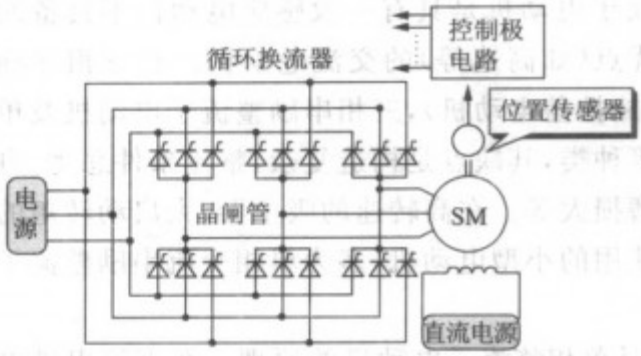


图7.96　交流无整流子电动机

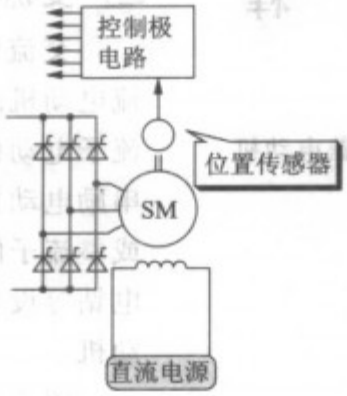


图7.97　直流无整流子电动机

无整流子电动机的特点

① 由于没有整流子，维护容易，寿命长。

② 没有整流子及电刷的整流问题，易于实现高电压、大容量和高速运行。

③ 可以实现从低速到高速的精密调速。

④ 没有火花发生，在条件恶劣场所也能使用。

⑤ 启动电流小，启动时不会给电源带来不良影响。

⑥ 因半导体变换部分流过脉冲形的电流会产生高次谐波，须注意不要影响电源。

无刷电机

无刷电机

无刷电机是用电子机构代替永磁式直流电机的整流子和电刷，具有控制性能好及效率高等优点（见图7.98）。电子装置由检测出永磁转子位置的霍尔元件及接受霍尔元件

的信号以切换电流的晶体管构成。

无刷电机具有永磁型直流电机的优点，因为没有电接触部分，不会产生机械噪声和电噪声，寿命长，多用于小型直流电动机。

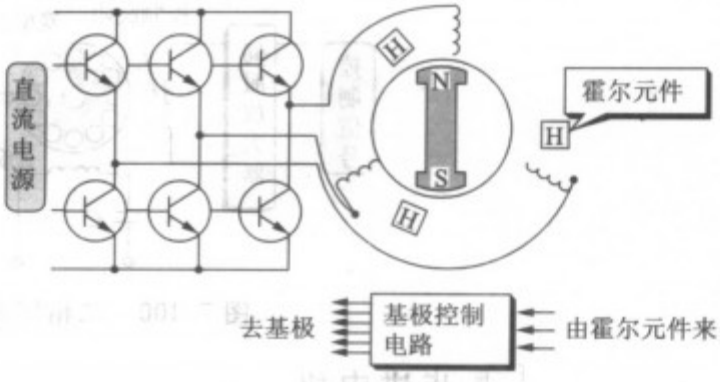


图 7.98 无刷电动机

磁滞电机

磁滞电机

磁滞电机是小型同步电动机。电枢上有二相绕组产生旋转磁场，转子用圆筒形磁钢制成(见图 7.99)。

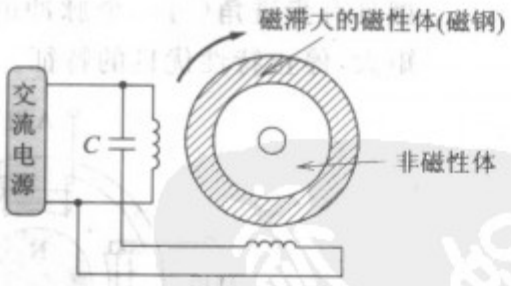


图 7.99 磁滞电机

磁滞电机有自启动性能，运行时是作为同步电动机旋转的。由于无转矩变化，而且运行非常平滑没有振动，用于录音机等音响设备。

伺服电机

伺服机构

伺服电机

用于**伺服机构**(控制机械的位置或角度的机构)的电动机叫**伺服电机**。广泛用在数控机床、产业机器人、计算机外围设备、自动平衡仪表及办公机器等。对于伺服电机来说，要求控制特性好，转子的惯性小，转矩大，形状是直径小，轴的方向长。

直流伺服电机

交流伺服电机

直流伺服电机使用永磁式直流电动机或无刷直流电动机。**交流伺服电机**有二相伺服电机(见图 7.100)、无整流子型的交流伺服电机及利用变换器对感应电动机进行矢量控制的交流伺服电机等。

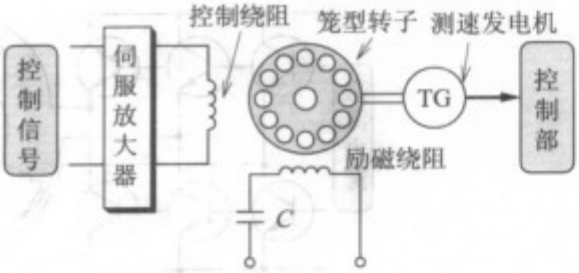


图 7.100　二相伺服电机

步进电机

步进电机

脉冲电机

步进电机也叫**脉冲电机**。使脉冲电流顺序流过电枢绕组来驱动转子。有利用电枢铁心与转子铁心的齿之间的磁阻差产生的力的 VR 型、利用永磁的 PM 型、或将二者结合的混合型等种类。图 7.101 是 PM 型步进电机原理。混合型具有**步进角**(每一个脉冲的旋转角),可以做得小,驱动转矩大,停止特性优良的特征。

步进角

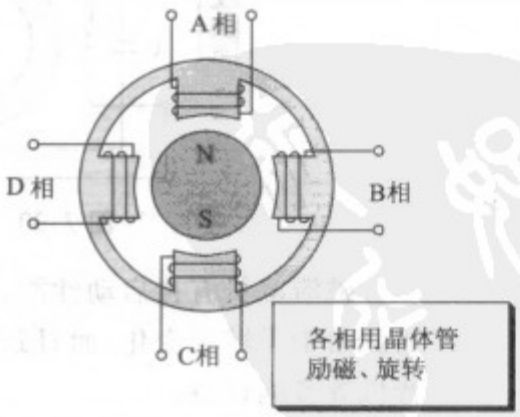


图 7.101　PM 型步进电机

步进电机的特征如下:

① 旋转角与脉冲数成正比,所以适合于速度控制及位置控制。

② 用脉冲信号驱动,适合与脉冲机器组合。

③ 正转、反转停止的控制性好。

④ 负载转矩过大或脉冲频率过高时，就无法响应脉冲，导致失去同步。

线性电机

线性电机

驱动力是直线形作用的电机叫**线性电机**。就是把电动机的电枢和转子剖开展成平面，使之构成直线状移动的电动机。它具有把旋转运动变换成机械直线运动的机构，没有机械摩擦和惯性，而且有响应速度快，控制性能好，易于维护等优点。线性电机用在运输、传送、办公机器及磁盘装置等。

线性感应电机

线性感应电机在定子上有三相绕组，产生移动磁场。移动子由导体和磁性体构成，由涡流电流产生的电磁力向移动磁场方向驱动。由于采用直流励磁，可以实现移动子的制动与保持。此外，在移动子上采用磁铁的是**线性同步电机**。

线性同步电机

线性直流电机

线性直流电机是利用永磁铁与直流电流间的电磁力 $F=BLI$，将线圈或永磁铁当作移动子。有优良的高速伺服性能，用于确定磁盘或光盘头的位置。缺点是长行程的难于制造。

线性脉冲电机

线性脉冲电机是把脉冲电机制成直线状(见图 7.102)。具有脉冲电机的控制性、位置保持性等特征，适于小型化。用在打印绘图机的打印头及磁盘驱动器的磁头运动。

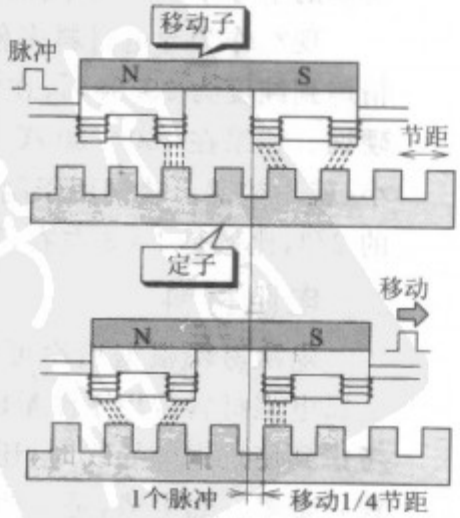


图 7.102 线性脉冲电机

22　电工材料

要　点

电工材料主要指形成电路的材料。在电工材料中有导电材料、电阻材料、电介质材料、绝缘材料、磁性材料及超导材料等。

解　释

导电材料

导电材料具有由物质决定的体积固有电阻 ρ，所以具有与长度成正比与截面积成反比的电阻值。该电阻值还随温度的增加而增加，这可以认为是在金属导体中的晶格振动加剧，妨碍自由电子的运动。其模型示于图 7.103。

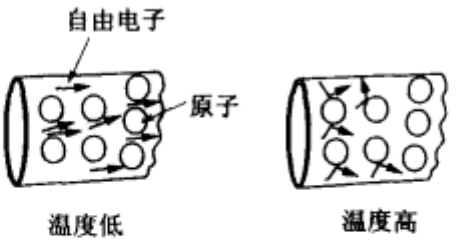


图 7.103　导体中的电子移动情况

国际标准软铜

对于**国际标准软铜**，$\rho = 1.7241\mu\Omega \cdot \mathrm{cm}$，$\alpha_t = 0.00393$，物质的电导率用相对于国际标准软铜的电导率之比来表示。

现在作为导电材料多使用铜和铝。铜用电解方法可以精炼到纯度为 99.99%，在常温下电阻率大而且坚硬，叫做**硬铜**。如果在 460～600℃ 退火可以变得柔软，电阻率也变小，就是**软铜**。软铜用于制造电线等。铝的电导率大约是铜的 2/3，比例是 1∶3 左右，用于制造输电线。

硬铜

软铜

电阻材料

电阻材料根据用途可大致分为限制电流用与发热用。金属电阻材料若用于测量的热电偶等，希望温度系数小。再考虑到使用铜做导线时，还希望铜的**热电势**小，所以使用铜镍合金等。热电势，是指两种不同的金属连接在一起，当有温度差时出现的电势，示于图 7.104。

电阻材料

热电势

另外，在作为电热线使用时，以温度系数大些为好，常使

用镍铬合金或铁铬铝合金等。

作为非金属的电阻材料，例如在碳化硅与碳的混合物里加上焦油沥青，烧结成形为棒状，当作发热体使用。

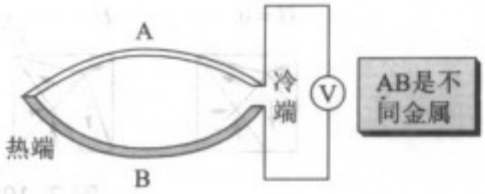


图 7.104 什么是热电势

电介质材料，绝缘材料

介质极化

把电压加在电介质或绝缘体时会出现正极、负极，这叫**介质极化**（见图 7.105）。利用其介质极化的叫做**电介质**；利用其不能通过电流特点的叫**绝缘体**。

电介质

绝缘体

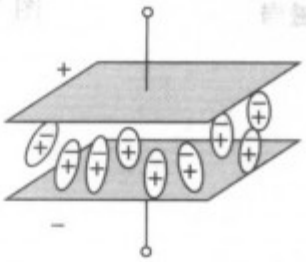


图 7.105 介质极化

在绝缘材料中有固体、液体和气体，由于热、电、机械力等会发生老化现象，在 JIS 里，根据容许温度对于热老化规定了耐热等级。

绝缘油

绝缘油是指用于电气绝缘的液体，大致分为矿物油系及合成绝缘油。用在变压器、电容、油浸电缆和断路器等。还可利用液体的性质，起到把机器内部的热量排放到外部的**冷却媒体**的作用。

冷却媒体

空气即使一旦发生绝缘破坏也能迅速恢复原来状态。在 20℃，一个大气压的均匀电场中的绝缘耐力约为 30kV/cm。气体的绝缘遵循**帕邢定律**（绝缘耐力是气压与电极间隔之积的函数的定律）。近年由于高压设备小型化的进展，使用 SF_6 以高压气体绝缘的方式，绝缘耐力为空气的 6 倍。

帕邢定律

为了判断绝缘的老化程度，在配线或电线相互间及大地之间使用绝缘电阻表。按低压电路或高压电路，分别使用 500V 的或 1000V 的绝缘电阻表。

磁性材料

磁性体

在电工电子学领域，**磁性体**通常是指对磁场有强反应的

强磁性体
磁畴
磁矩

强磁性体。强磁性体的性质是根据原子的状态生成的，图7.106表示叫做**磁畴**的小磁铁，可以看作是许多**磁矩**的集合。

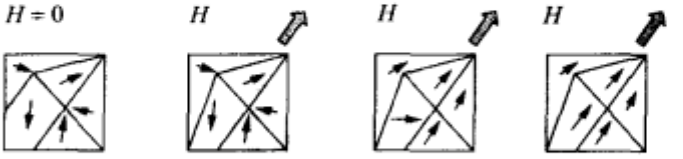
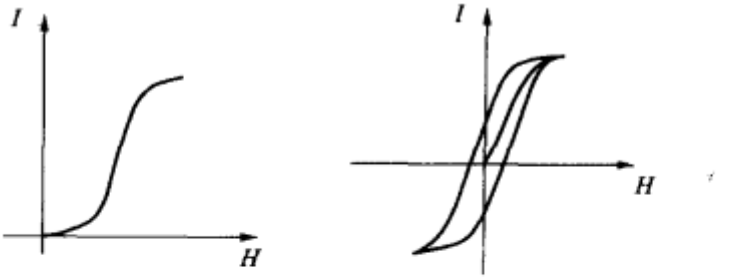


图7.106　磁化过程

铁磁性体
铁氧磁性体
磁滞

在强磁性体中，在磁矩相互平行，有规律地排列着**铁磁性体**和磁矩不平行的**铁氧磁性体**。一般的磁性体如图7.107所示，具有对外部磁化的反应滞后(**磁滞**)的现象。



(a) 磁化曲线　　(b) 磁滞回线

图7.107　磁化曲线与磁滞回线

铁损
涡流损耗

磁性体的损耗叫**铁损**，其中有因磁滞引起的损耗，以及在交变磁场中感应的涡流电流在磁性体中产生焦耳热的**涡流损耗**。

在铁里加入硅元素，由于铁损特性使电阻率 ρ 增加，使磁各向异性能量减少。如果加硅量多，虽然可减少铁损但材料变脆。变压器等的铁心是用硅钢轧成的硅钢片，每片涂以绝缘清漆层叠制而成。

坡莫合金
铁淦氧
永磁铁淦氧
高磁导率铁淦氧

78.5%镍和21.5%铁的合金叫**坡莫合金**，是高磁导率的磁性体，用作永磁材料。**铁淦氧**分为**永磁铁淦氧**和**高磁导率铁淦氧**。永磁铁淦氧是在铁氧化物中渗入钡，经过烧结、粉碎、压制成形，用作小型电动机等的永磁材料。高磁导率铁淦氧是镍锌合金或铜锌合金，电阻率比金属大，用作高频变压器等。

超导材料

临界温度
相转移
超导

如果把某种物质一直冷却下去，在某一温度（**临界温度**）会发生称为**相转移**的现象，电阻急剧变为零（见图 7.108）。1911 年用水银确认，叫做**超导**。那时的温度是 22K，使用液态氦冷却。在 1980 年发现了用金属氧化物在 77K 以上的**高温超导材料**。这个温度是用液态氮能够实现的温度。

高温超导材料
麦斯纳效应

在超导状态下，产生称为**麦斯纳效应**的完全反磁性的现象。图 7.109 表示把磁力线完全拉进来的强磁性体和把磁力线完全推斥到外面的反磁性体的情况。超导状态会随温度、电流的面密度及磁场的情况而消失。这时的温度、电流、磁场分别叫**临界温度** T_c、**临界电流密度** J_c 和**临界磁场** H_c。超导也写成超导电，二者意义相同。超导材料应用在线性电机、超导磁铁、磁流体发电等需要强磁场的装置中。

临界温度
临界电流密度
临界磁场

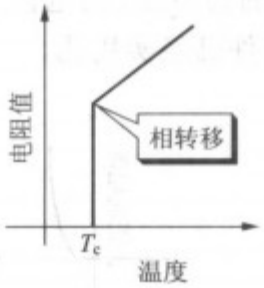


图 7.108 临界温度与相转移

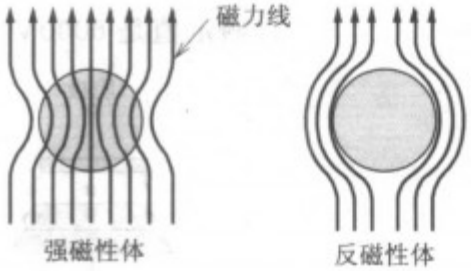


图 7.109 强磁性与麦斯南效应

23　电力半导体器件

要　点

半导体具有导体和绝缘体的中间性质，可以控制导通状态和绝缘状态。

电力的变换与控制基本是利用高速开关动作。为此使用像晶体管那样有控制端子的开关元件。可以用在高电压、大电流的半导体叫电力半导体。

解　释

二极管

电力二极管

二极管是利用半导体的 pn 结的整流作用(见图7.110)。由于近年半导体制造过程的发展，可以提高电流的面密度。**电力二极管**可大致分为利用整流作用的和利用产生稳定电压的。作为一般用途的高电压、高电流二极管，最大额定值是 6000V、4500A 的器件已经实用化。

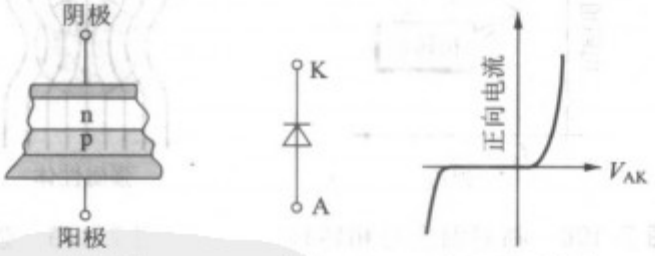


图 7.110　二极管

电力晶体管

电力晶体管

电力晶体管与通常的晶体管一样，可以用基极电流的有无使导通状态发生变化(见图7.111)。一般晶体管里有截



图 7.111　电力晶体管

止区、工作区和饱和区的状态，用于电力时多用在截止区或饱和区。像直流伺服系统那样，有必要在线性控制的场合使用工作区。利用晶体管的基极电流可随时控制电路的通断。最大额定值是1200V、300A的器件已经实用化。

什么是晶闸管

晶闸管

半导体开关元件

晶闸管是由三个以上的pn结组成，是具有通和断两种稳定状态的**半导体开关元件**的总称。额定电流为0.2～3000A，额定电压4000V左右的器件已大量生产，6000～8000V的产品也正在开发中。从狭义上来说，晶闸管一般是指反向关断三端晶闸管。

反向关断三端晶闸管

构造示于图7.112，在控制极上加触发脉冲时，阳极与阴极处于导通状态。可是控制极不能控制关断，用在直流电路时必须有换流电路。控制导通角以达到控制电压或电流，这叫**相位控制**。

相位控制



pn结断面　　符号　　电压-电流特性

图7.112　反向关断三端晶闸管

门极可关断晶闸管(GTO)

与反向关断三端晶闸管同样具有阳极、阴极和控制极三个端子。在控制极加正向电流时导通；加反向电流则关断(见图7.113)。另外也叫**GCS**(Gate Controlled Switch)。

GCS

双向三端晶闸管(Triac)

双向三端晶闸管

晶闸管只能顺向流过电流，反向就阻断。而**双向三端晶闸管**具有反方向也能通电流的性质(见图7.114)。

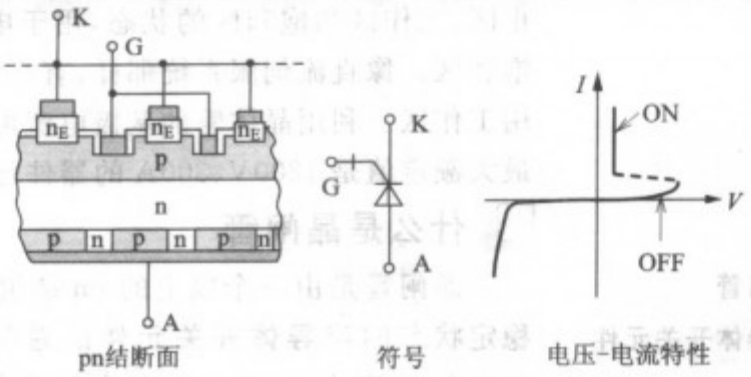


图 7.113　门极可关断晶闸管

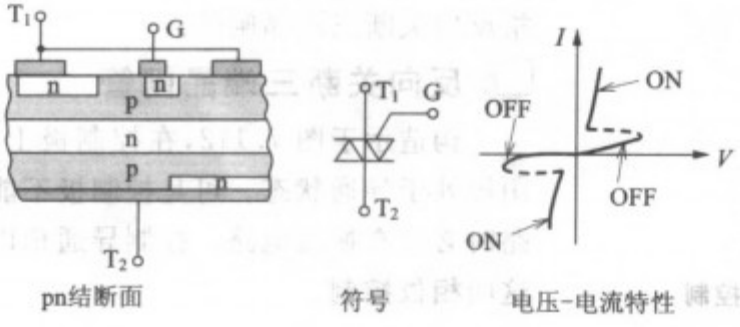


图 7.114　双向三端晶闸管

功率场效应管(Power-MOSFET)

寄生晶闸管

功率场效应管的特征是高速开关动作，驱动电流小(见图 7.115)。但因为有 pnpn 的构造，存在**寄生晶闸管**，难于大电流化及导通电阻大等难点。

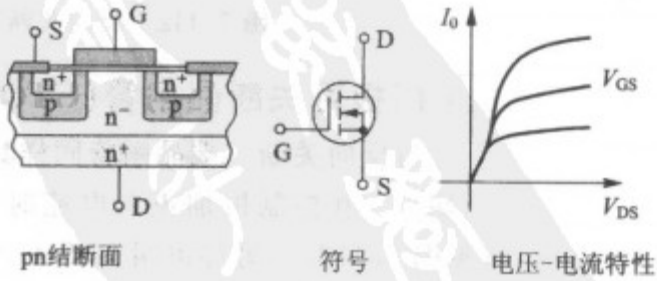
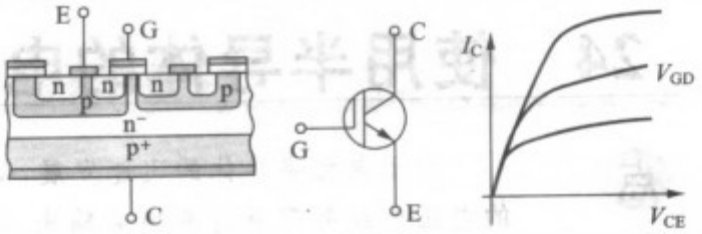


图 7.115　功率场效应管

IGBT

IGBT

IGBT(绝缘栅型双极晶体管)是在 MOS-FET 的高速开关的性质上又加上像双极晶体管那样能够大电流化的性质，可以说是混合性质(见图 7.116)。



pn结断面　　符号　　电压-电流特性

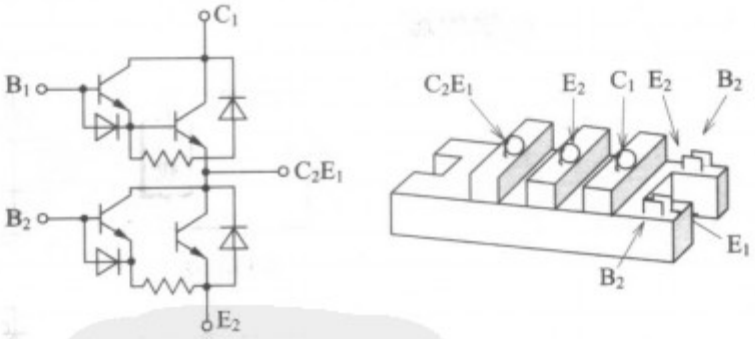
图 7.116　IGBT 绝缘栅型双极晶体管

电力微型混合集成电路

电力微型混合集成电路

复合组件

使分立器件形成有功能的电路要有布线作业。按预定目的把分立器件组装在电路内的制品就是**电力微型混合集成电路**(也叫组件)。通常多以使用的器件名称命名,如二极管组件、三极管组件等,还有把二极管、三极管组合在一起的**复合组件**。图 7.117 示其一例。



内部等效电路　　外观

图 7.117　电力复合组件举例

24　使用半导体的电力变换

要　点

由于电力半导体的飞速发展，使用半导体器件将输入侧的电压值或频率进行变换后输出已成为可能。与以往的电力变换装置不同，在现代，这些电力变换是很重要的。因输入电源及输出电源的组合，可有整流、逆变换、频率变换及直流变换等。

解　释

整流装置

单相半波整流
单相全波整流
三相全波整流

使用具有整流作用的器件，从交流电源变换为直流电源的装置就是整流装置。根据整流器件的组合方式有**单相半波整流**、**单相全波整流**及**三相全波整流**（见图 7.118）。整流装置用在直流电动机的控制或电镀等需要直流大电流的电化学领域。

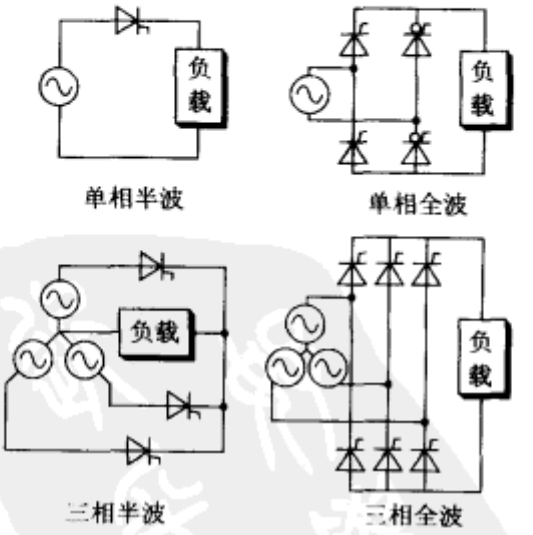


图 7.118　整流装置

相位控制

如能进一步使用像晶闸管那样用栅极控制通断的器件，如图 7.119 所示，使点弧角度变化（**相位控制**），就能改变电压值。

逆变器

变换器

也叫**变换器**，是从直流电源变换为交流电源的装置。如

图 7.120、图 7.121 所示，把直流电源设想为电池，即可得到所要求频率的交流电源。

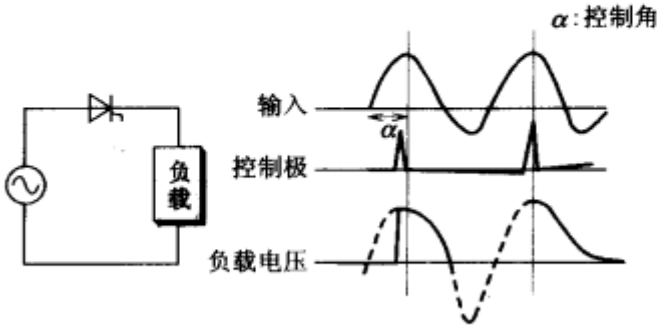


图 7.119　相位控制

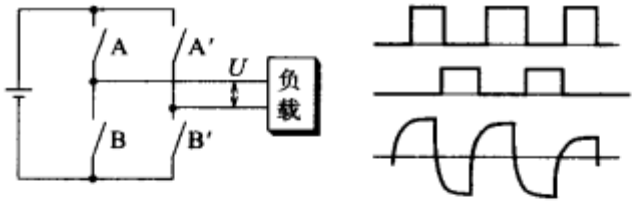


图 7.120　单相变换器基本电路

把图 7.120、图 7.121 中的开关用晶体管或晶闸管等半导体来代替就是实际变换器的主电路。用于计算机或医院等必需的无停电电源，以及因为能发出任意频率而用在感应电动机的频率控制等。

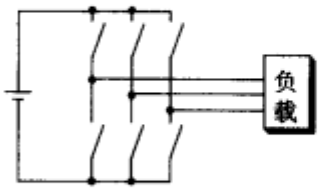


图 7.121　三相变换器基本电路

一般方形波含有很多高次谐波，要将其变为正弦波有使电压脉冲的宽度变化的方式，这叫**脉宽调制**(PWM：Pulse Width Modulation)方式(见图 7.122)。

脉宽调制

频率变换装置

频率变换可由整流与逆变换组合而成，但直接变换频率的装置叫**循环变频器**(也叫直接变频器或交-交变频器)。这是用控制正向和反向的点弧时刻与通电时间来实现的。通常如图 7.123 所示，必须有维持正向的晶闸管和维持反向的晶闸管。用于同步电动机的变频控制及感应电动机的控制等。

循环变频器

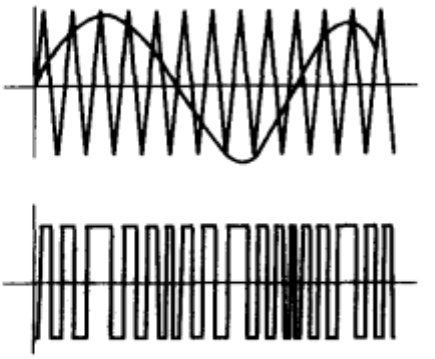


图 7.122　脉宽调制波形

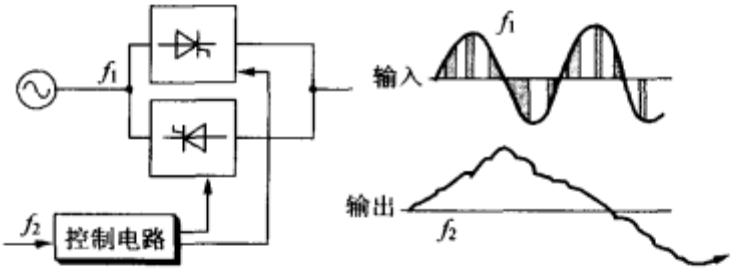


图 7.123　循环变频器

直流变换装置

直流斩波器

降压斩波器

升压斩波器

与其说变换不如说是直流电力控制，直流变换装置就是不断把电源接通、切断，可随意产生任意直流电源（见图 7.124）。直流变换装置还叫做**直流斩波器**，在交流变换的变压器中曾用到匝数比，在这里与其相当的则是通电时间。输出电压比电源电压低的叫**降压斩波器**，比电源电压高的叫**升压斩波器**。用于开关调整器等。



图 7.124　斩波器基本电路

交流电力调整器

交流斩波器

也称为**交流斩波器**，可以看作是把直流斩波器适应了交流的产物。图 7.125 示出用相位控制的方法改变电压以调

整电力的装置。用于感应电动机的电压控制或调光电源。

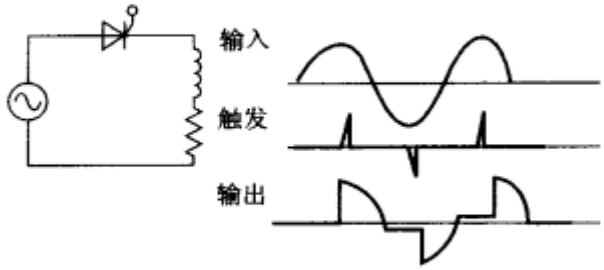


图 7.125　交流斩波器

相关知识

◆ 半导体电力变换装置的用途

在交流电动机的控制中与微处理器结合，以精确的点弧进行感应电动机的矢量控制。还可以在直流电动机的控制中用斩波器控制实现无级调速。近几年，在研究磁流体发电或用燃料电池的直流发电方式，但为了转换成商用电源，还需将这些技术结合在一起。开关电源含有很多高次谐波，消除电磁感应故障将是今后的课题。

第 8 章

电力系统

● 责任编委
冈本裕生
● 执　　笔
冈本裕生 (1)
关　敏昭 (2 ~ 6)
东　英道 (7 ~ 15)

随着经济的发展，电能正在广泛地应用到家电产品、工厂动力、计算机和通信方面，电能的消费量也在不断增加。日本能量资源的自给率很低，大约80% 要依靠海外输入。因此，一方面在对电源的开发谋求多样化的同时，另一方面在推进研究和开发更为有效的发电系统。

在这一章，要学习现代发电系统及燃料电池发电等新能量形式的发电，同时还要学习有关输电、配电等电力系统，以及系统中的设施、设备、保护装置等。

1　能量资源与电力供应

要　点

电能是保证每一天正常生活的重要能量。电能是由作为发电燃料的石油、煤炭、铀等提供的能量变换而来的。但是现在日本的能源大部分要依靠海外输入。所以在日本是采用石油、天然气、煤炭、原子能、水力等配合的一种平衡的发电方式，以实现稳定供电。另外，还要考虑环境保护问题，进行风力发电、太阳光发电、燃料电池发电等的研究和开发工作。

解　释

发电用的能源

电给人们的生活带来方便和舒适，这些都是依靠各种能源作为发电的燃料。作为发电用能源的条件，必须是资源丰富，容易利用，资源的可靠性高且要经济。

图 8.1 是表示作为电能资源的可采年数，可见资源是有限的。对于资源匮乏的日本来说形势更为严峻，但是电源的构成则能很好地平衡利用各种能源。

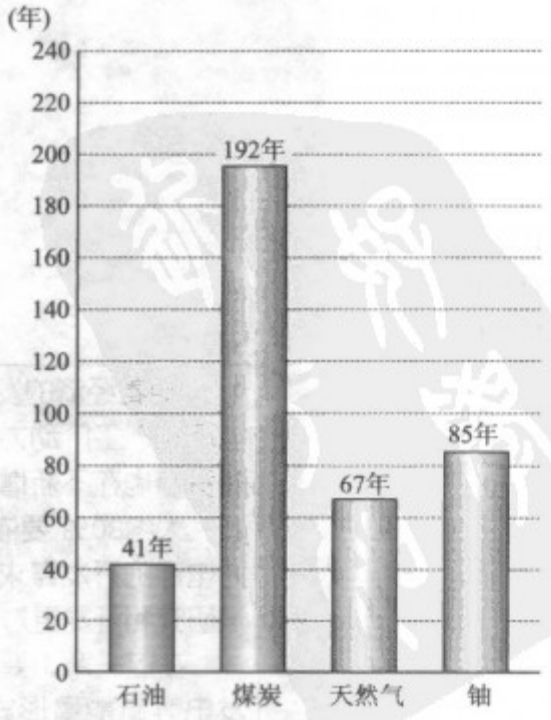


图 8.1　资源的可采年数(据 2004 年综合能量统计)

如果把石油、天然气、煤炭、原子能等资源量的可采年数进行比较，可以知道现在煤的可采年数最长，接着是铀、天然气和石油。

按能源区分的发电方式

表 8.1 表示根据不同能源的发电方式。发电量的 90% 依靠石化能与核能，其余是以水力为中心的自然能量发电。近几年最引人注目的是，正在开发研究的利用自然能量的太阳光发电、风力发电、燃料电池发电等。在发电时不排出二氧化碳，使用这些清洁的能源是防止全球变暖的对策之一。

表 8.1 根据不同能源的发电方式

能源		发电方式	原动机的种类	发电的方法(能量的形态)
石化能	煤炭、重油、液化天然气、液化石油气	火力发电	蒸汽涡轮机	使用锅炉产生高温高压的蒸汽
	重油、汽油、天然气	内燃力发电	柴油机、汽油机、煤气机	内燃机使燃料在机器的内部燃烧，将燃烧的爆发力变换为机械力而旋转，驱动发电机发电
	压缩空气、天然气、重油	燃气轮机发电	燃气轮机	将燃料喷射到压缩空气中，使其产生高温高压的燃烧气体，利用其热能
核能	天然核燃料铀 235 人工核燃料钚 239	原子能发电	蒸汽涡轮机	利用核燃料裂变联锁反应发生的热能，驱动蒸汽涡轮机旋转
自然能等	水	水力发电	各种水轮机	将水具有的位能(落差)变换为机械能
	太阳光	太阳光发电	—	利用太阳电池
	太阳热	太阳热发电	蒸汽涡轮机	将太阳的热量集中、蓄积，并利用它产生蒸汽
	风(自然风)	风力发电	风轮	利用自然风吹转风轮驱动发电机
	地热(喷出蒸汽)	地热发电	蒸汽涡轮机	利用地下岩浆的热量，使地下水喷出蒸汽
	波浪	波浪发电	空气涡轮机	利用波浪起伏的高低差使空气室的压力发生变化
	氢、氧	燃料电池发电	—	利用氢与氧的化学反应产生的能量

电力需求及电源构成

图 8.2 表示日本的电力消费是随着高度地增长而逐年大幅度增加。但近几年因消费降温及产业结构的转换而有

减缓的倾向，估计今后会以 1%左右的增长率推移。

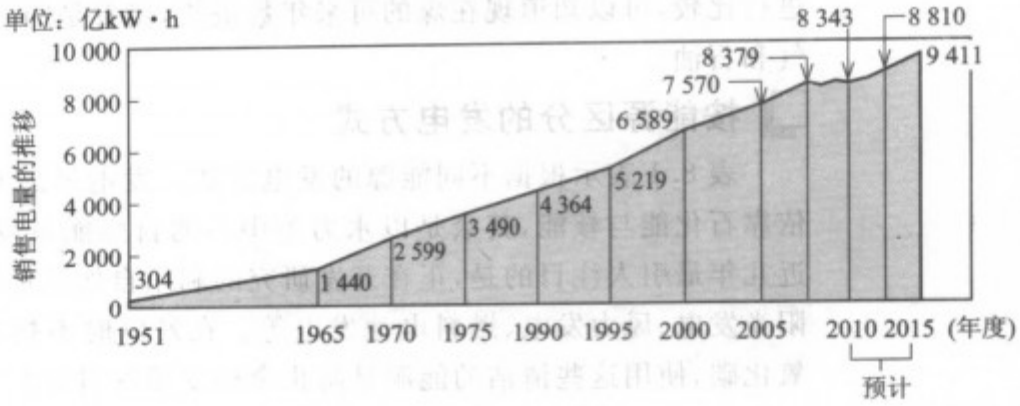


图 8.2　销售电量的推移(电气事业联合会)

另外，如果从电源的构成比看电力的供给，以前是以水力发电为中心，由于石油的出现，在 20 世纪 30 年代前、后火力发电超过了水力发电。火力发电的燃料是使用石油、煤炭、天然气等，但是在石油危机之后，由于石油供应的不稳定，逐渐被原子能发电取代。图 8.3 表示发电量的构成比。

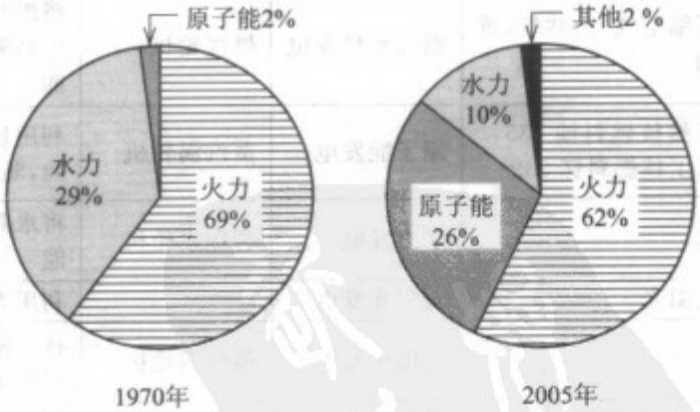


图 8.3　发电量的构成比

电力的需求与供应

要想稳定地供电，必须随时根据需要投入相应的设备。但是在近几年，电力的供、需随着时间段和季节的改变有很大的差异。特别是昼夜的差距有逐年增大的倾向。按照所需要的峰值投入全部发电设备的时期与不得不将设备的余力闲置的不平衡情况正在扩大。这种不平衡使设备的利用效率低下，带来电力成本上升。为了缩小需求和供应的差

距，人们正在致力于削峰填谷的工作。

图 8.4 表示为了适应现在需要的变化，充分发挥水力、火力、原子能等能源的特性，使电源相互配合而且能平衡的运行情况。

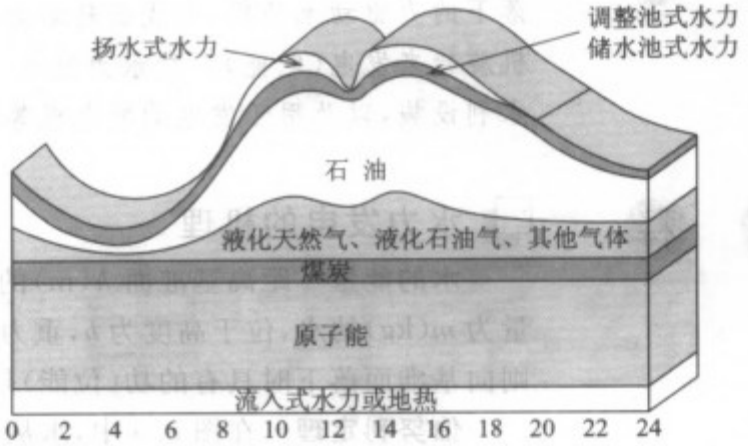


图 8.4 与需要的变化相适应而调整发电厂的运行

相关知识

◆ **能源的特性**

扬水式水力　在夜间电力供应有富余时抽水储存，白天高峰时利用发电。适用于高峰用电。

石油火力、液化天然气、液化石油气　对电力需求的变动反应迅速。适用于高峰用电。

原子能、煤炭火力、流入式水力　连续发电，适用于负荷稳定的电源。

2　水力发电

要　点

水力发电是利用位于高处(势能)的河川或储水池的水落下的力驱动水轮机,变成旋转动力(机械能)后再带动发电机旋转来发电(电能)。在水力发电厂有水库、水坝、水道等水利设施,以及用于发电的发电机等设备。

解　释

水力发电的机理

水的能量　距离基准面 h(m)的高度叫做水头,假设质量为 m(kg)的水,位于高度为 h,重力加速度为 $g(9.8\text{m/s}^2)$,则向基准面落下时具有的功(位能)是 mgh(J)。

伯努利定理　在图 8.5 中,水从水压管路向基准面下降时,水在距离基准面为 h_1(m)及 h_2(m)的点①及点②所具有的能量可以用以下 3 种形式表示。

	点①	点②
势能	mgh_1	mgh_2
动能	$\frac{1}{2}mv_1^2$	$\frac{1}{2}mv_2^2$
压力能	$m\frac{p_1}{\rho}$	$m\frac{p_2}{\rho}$

距离基准面的高度：h_1(m)、h_2(m)
压力：p_1(Pa)、p_2(Pa)
流速：v_1(m/s)、v_2(m/s)
重力加速度：g(m/s²)
水的密度 ρ(kg/m³)

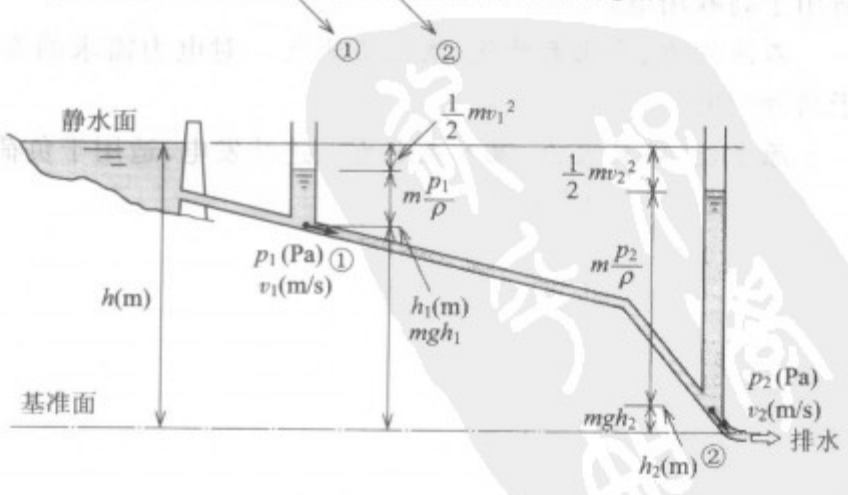


图 8.5　伯努利定理

根据能量守恒定律,水管中的水在①、②点的能量总和等于最初具有的能量 mgh,即使高度或流速变化也保持恒

伯努利定理

定。这叫做**伯努利定理**，即

$$mgh_1+\frac{1}{2}mv_1^2+m\frac{p_1}{\rho}=mgh_2+\frac{1}{2}mv_2^2+m\frac{p_1}{\rho}\quad(\text{一定})$$

$$h_1+\frac{p_1}{pg}+\frac{V_1^2}{2g}=h_2+\frac{p_2}{pg}+\frac{V_2^{\ 2}}{2g}=H\quad(\text{一定})\tag{8.1}$$

有效落差及理论水力 如图 8.6 所示，假设水轮机的位置是基准面，到储水池静水面的高度 H_a(m)叫做**总落差**。由水道的坡度或管壁与水的摩擦造成的能量损失叫做**损耗落差** H_l，则有效落差 H(m)以式(8.2)表示，即

总落差

损耗落差

$$H=H_a-H_l\tag{8.2}$$

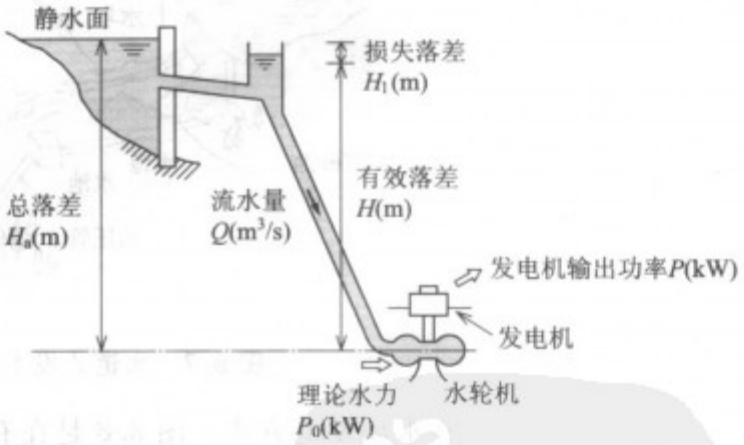


图 8.6 有效落差及理论水力

有效落差一般是总落差的 70%～90%。

如果有 Q(m³)的水从总落差 H_a(m)的高度流入水轮机，因为 1m³的水质量是 1000kg，因此有 $mgh=1\,000Q\times9.8\times H=9800QH$(J)的能量供给水轮机。所以供给水轮机的动力 P_0 是：

$$P_0=9\,800QH(\text{J})=9800QH(\text{W})=9.8QH\ (\text{kW})\tag{8.3}$$

式中，P_0 叫做理论水力。P_0 使水轮机旋转，水轮机的输出就是发电机的输入。设水轮机的效率为 η_w，发电机的效率为 η_g，发电机的输出功率为

$$P=9.8QH\eta_w\eta_g\ (\text{kW}) \tag{8.4}$$

$\eta_w\eta_g=\eta$，称为总效率，通常为70%～90%。

发电方式

按照从取水到排水的结构或利用水方法的不同，水力发电厂还可以分类如下：

(1) 按照构造不同分类

① 水道发电方式。图8.7是在河流的上游建立拦水坝。通过水道将水引导到能取得适当落差的地点，使之与河流的下游之间形成落差的发电方法。



图8.7　水道式发电方式

② 水坝发电方式。图8.8是在有陡峭峡谷的河流建设水坝，形成水库以提高水位。利用落差的发电方式。

③ 水坝水道发电方式。图8.9是水道与水坝并用，将水坝拦蓄的水引导到下游，以得到更大落差的发电方式。

(2) 按照利用水的方法分类

① 流入式发电。直接引河流水发电。但随河流的满水期或枯水期的交替发电量会发生变化。

② 调整池式发电。将河川的流水储存在调整池内，高峰负荷时放水发电。可以调整一天到几天的发电量。

③ 储水池式发电。将水储存在比调整池规模大的水库内，必要时放水发电的方法。能将一年内的多余水储存发电。

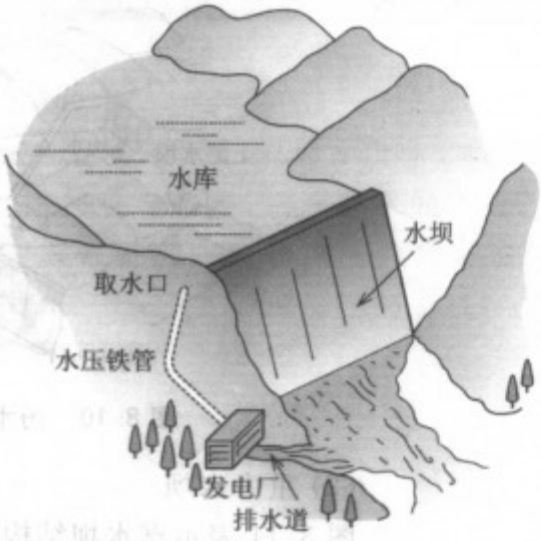


图 8.8 水坝发电方式



图 8.9 水坝水道发电方式

④ 逆调整池式发电。在调整池式发电厂或储水池式发电厂的下游设立调整池，存水发电。

⑤ 扬水式发电。图 8.10 表示利用原子能发电厂或大容量的火力发电厂在深夜或周末的多余电力，用泵将排放到下游的水打到上游的水库或调整池储存，高峰负荷时放水发电。

水力发电厂的水利设施及设备

(1) 发电用水坝

为了拦住河川或峡谷中的水流，按使用目的分类有以取水为目的取水水坝，以及储存水的储水水坝。

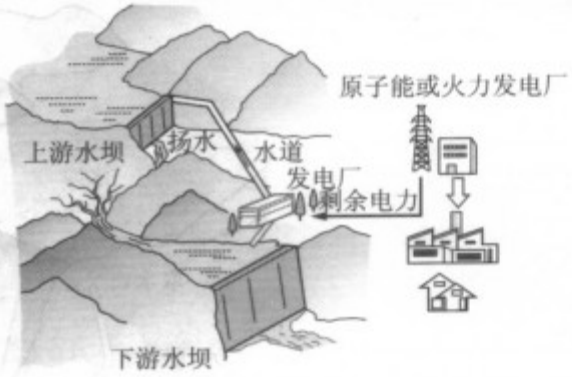


图 8.10　扬水式发电厂夜间

(2) 重力水坝

图 8.11 表示靠水坝结构体自身的质量维持水压。在日本建得最多。

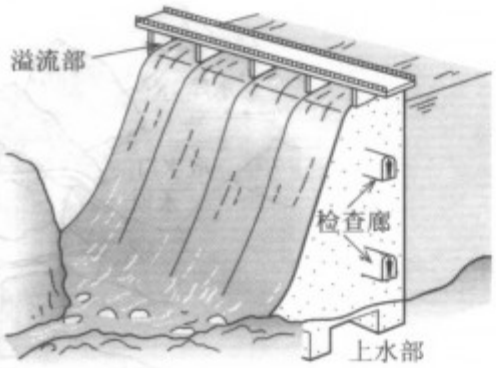


图 8.11　重力水坝

(3) 填石水坝

图 8.12 表示在堆积岩石的内侧用泥土等制成的防水结构。适用于附近有岩石或泥土并容易运输的场合。

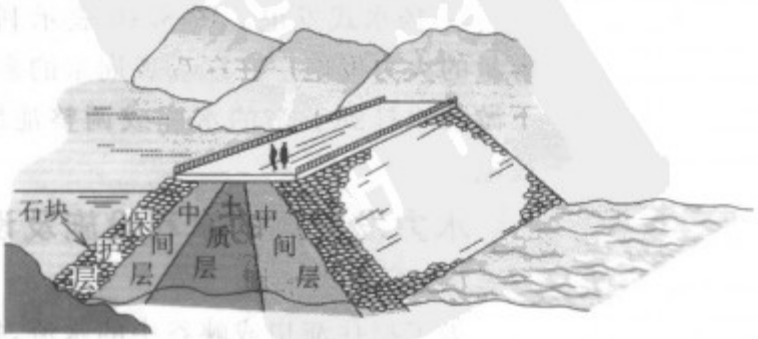


图 8.12　填石水坝

(4) 拱形坝

图 8.13 是用混凝土制成拱形的坝，两岸是坚固的岩盘，能耐水压。特点是坝体的厚度薄，用的材料少。

(5) 水闸门

用于水坝满水时放水，枯水时存水。水闸门按构造分类，有图 8.14 表示的为升降式，此外还有转动式、伸缩式等。



图 8.13 拱形坝

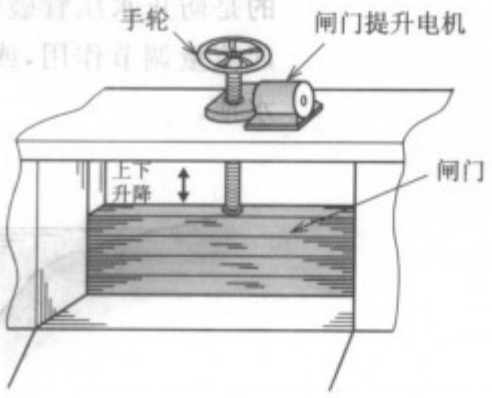


图 8.14 水闸门

(6) 水道

在水道中有取水口、沉砂池、引水道、水池、排水道等设备。

① 取水口。汲取水的设备。图 8.15 示出有彻底清除垃圾的过滤网，河底有阻水栏等设备。

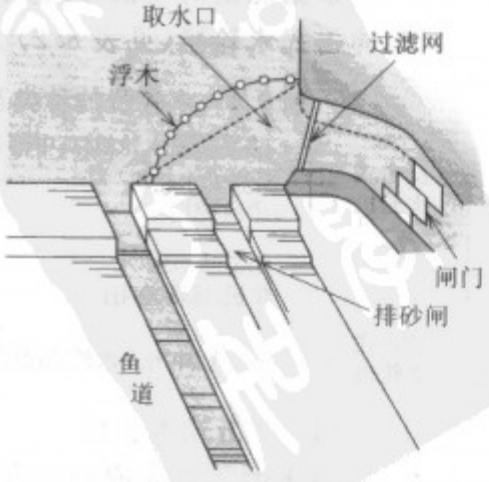


图 8.15 取水口

② 沉砂池。使水中含有的泥砂沉淀的设备。

③ 引水道。使水从取水口自然流到水池的水道。分成不承受水压的无压水道及管内充满水而承受水压的压力水道。

④ 浪涌调整池。见图 8.16，在上部是在压力水道与水压管的连接处设置的开放水池，浪涌调整池的功能是减轻负荷骤变时水压管道内的水锤作用(管内的压力异常变动)，目的是防止水压管破裂。此外还用于无压水道，是负荷骤变时起流量调节作用，或能除去流水中的泥砂、漂浮物的落差储水池。

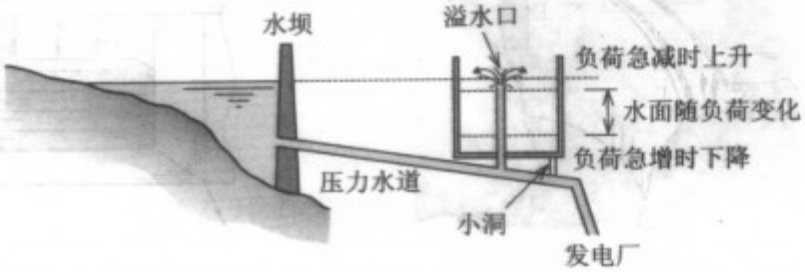


图 8.16　浪涌调整池

⑤ 水压管道。从水池到水轮机的水道。在水压管道上的始端、终端有控制水流用的碟阀、闸阀、球阀、针阀等。

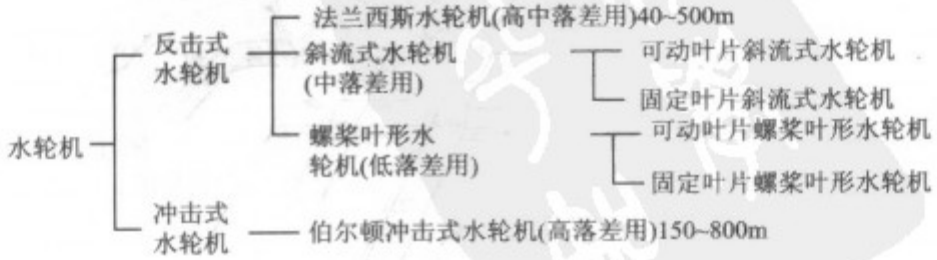
⑥ 排水道。将水轮机排出的流水引到河中的设备。

水轮机的种类及构造

反击式水轮机
冲击式水轮机

根据能量的变换方式，水轮机可以分类为**反击式水轮机**与**冲击式水轮机**(见表 8.2)。

表 8.2　水轮机的种类及构造



(1) 反击式水轮机

由水的落差形成的具有压头的水流入叶轮，水通过叶片流出时的反动力使其旋转。图 8.17 是**法兰西斯水轮机**，图 8.18 是**卡普兰水轮机**。通过这种水轮机叶轮的流水方向与

法兰西斯水轮机
卡普兰水轮机

轴倾斜。

(2) 冲击式水轮机

把具有压头的水变成速度头，从水压管前端的喷嘴喷出的高速水冲在戽斗上使叶轮旋转。这种用水的冲击力旋转的水轮机叫做冲击式水轮机。图 8.19 示出的是**伯尔顿水轮机**。

伯尔顿水轮机

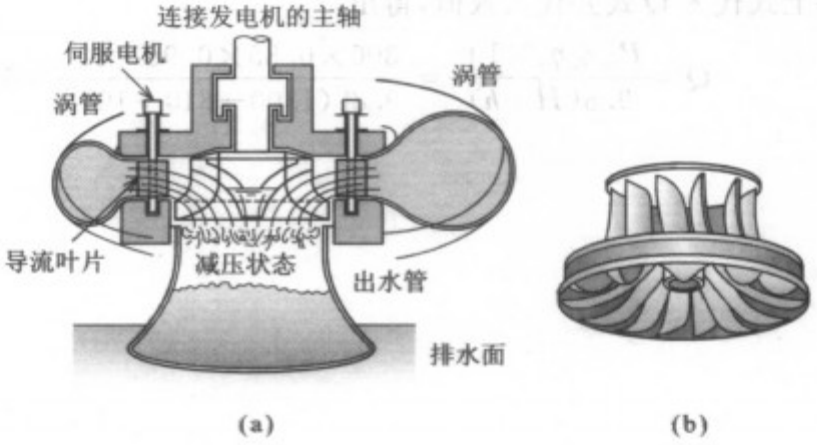


图 8.17 法兰西斯水轮机

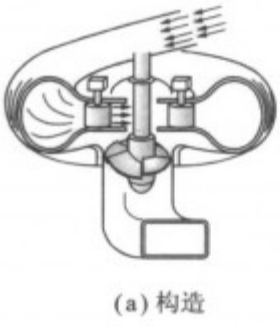


图 8.18 卡普兰水轮机

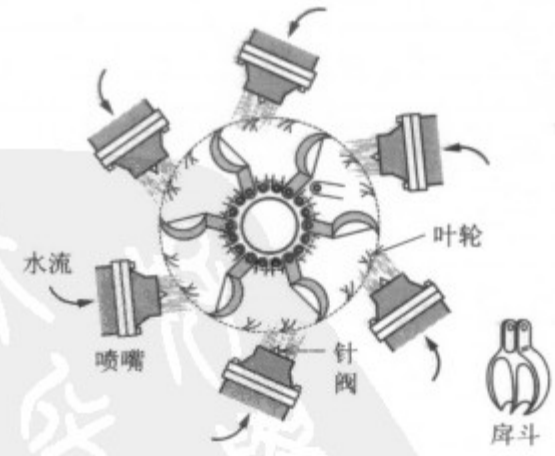


图 8.19 伯尔顿水轮机

例 题

1 扬水发电站的一台发电电动机运行。上池水位标高 1 300m，下池水位标高 810m。发电电动机的输入是 300MW。此时的扬水量(m^3/s)是多少？设水泵的效率为 85%，电动机效率 98%，损失水头 10m。

答 设扬水所需的电力为 P_0(kW)，扬水量 $Q(m^3)$，损失水头 h(m)，上池

与下池的水位差 H(m)，总扬程为($H+h$)(m)时，发电电动机的输出(水泵水轮机的输入)P_{mo}与发电电动机的输入 P_{mi}分别为：

$$P_{mo}=\frac{P_0}{\eta_p}=\frac{9.8Q(H+h)}{\eta_p}\ (\mathrm{kW})$$

$$P_{mi}=\frac{P_{mo}}{\eta_m}=\frac{9.8Q(H+h)}{\eta_p\eta_m}\ (\mathrm{kW})$$

将上式代入 Q 式并代入数值，得出

$$Q=\frac{P_{mi}\eta_p\eta_m\times10^3}{9.8(H+h)}=\frac{300\times0.85\times0.98\times10^3}{9.8[(1300-810+10)]}=51\ (\mathrm{m^3/s})$$

3 火力发电

要 点

许多火力发电是采用汽轮机的方式。用锅炉燃烧石油、煤炭、液化天然气等燃料，产生出高温、高压的蒸汽输送到汽轮机，转换成机械能（动力）使发电机旋转，最后变成电能。

火力发电可以实现大功率，也可以根据用电量来调整输出，所以在发电产业中起主要的作用。

解 释

火力发电的种类

火力发电按照变换成机械能的原动机种类可以区分如下：

蒸汽轮机发电 参见图 8.20，在锅炉中燃烧燃料产生高温、高压蒸汽，使蒸汽涡轮机旋转带动发电机旋转发电。在当前的火力发电中，发电能力及发电量都占很高的比例。

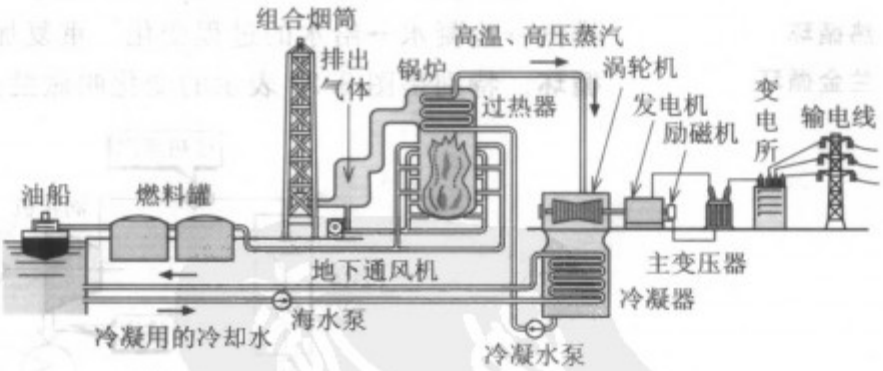


图 8.20 火力发电厂的构成

燃气轮机发电 原动机是用煤油或轻油的燃烧气体使涡轮机旋转及发电机旋转的发电方式。电力负荷高峰时担任削峰使命。

组合循环发电 图 8.21 是燃气涡轮机与蒸汽涡轮机组合起来的发电方式，热效率高。蒸汽力发电的热效率约为 41%，而组合循环发电可以达到 48%～53%。另外，还容易在短时间内启动或停止，能很快响应电力需要的变化。

内燃力发电 用柴油机等内燃机驱动发电机旋转的发电方式。除柴油机外，还有用汽油机、石油机、煤气机等。适

用于孤岛等小规模的发电。

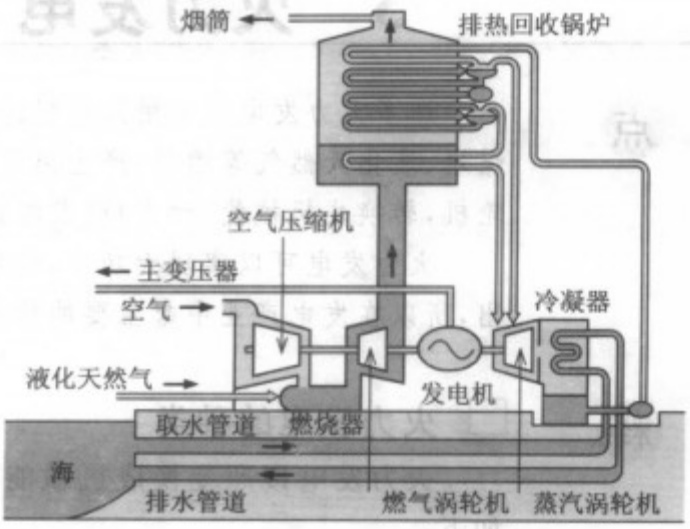


图 8.21　组合循环发电的结构

火力发电厂的热循环

热循环
兰金循环

兰金循环　从给水泵送往锅炉的水，按照给水→蒸汽→排汽→冷凝水→给水的过程变化。重复加热和排放，叫做**热循环**。特别是图 8.22 表示的变化叫做**兰金循环**。

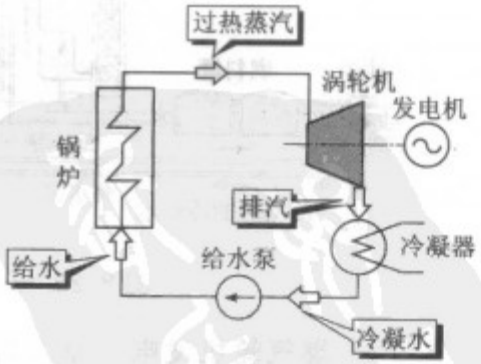


图 8.22　兰金循环

用给水泵送往锅炉的水，在锅炉加热变成饱和蒸汽后再送往过热器。此蒸汽再加热成为过热蒸汽送往蒸汽涡轮机。蒸汽在涡轮机内急剧膨胀，其力量作用在涡轮机的叶片上使涡轮机旋转。排出的蒸汽(排汽)又在冷凝器得到冷却，成为原来的水(冷凝水)。

再生循环　图 8.23 是在涡轮机的中间取出一部分蒸汽

再生循环

来加热给水用的水，这种热循环叫做**再生循环**。由于是从涡轮机中间取水，涡轮机的功率有所下降，但是给水得到加热使热效率提高。

再热循环　图 8.24 是使高压涡轮机排出的湿蒸汽返回锅炉，再度加热后成为高温的干蒸汽，用于低压涡轮机。这种热循环叫做**再热循环**。

再热循环

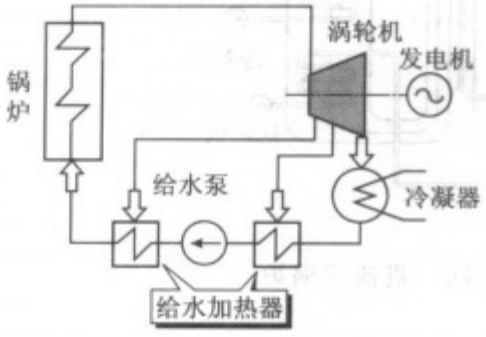


图 8.23　再生循环

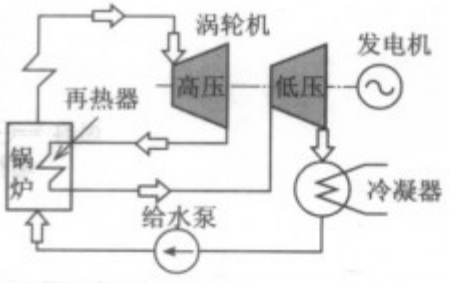


图 8.24　再热循环

再热再生循环

图 8.25 是将再生循环与再热循环组合使用。热效率高，大型火力发电厂基本都是**再热再生循环**方式。

再热再生循环

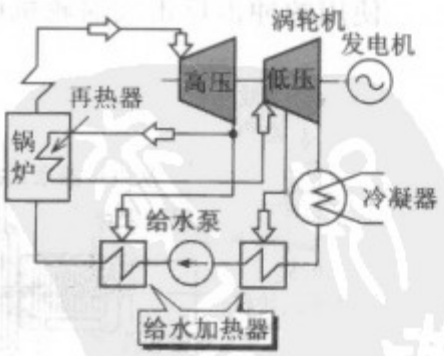


图 8.25　再热再生循环

锅炉设备

锅炉是使燃料燃烧加热水的装置。按照水的循环方式，锅炉可以分类为自然循环式或强制贯流式，贯流式等。图 8.26 是**贯流式锅炉**的结构。燃料燃烧后将热量传给蒸发管，再经过过热器、再热器、节煤器、空气预热器，放出热量后再通过电除尘装置排气。不需要上汽锅就可以得到温度为

贯流式锅炉

560℃的蒸汽，压力为25MPa左右的临界温度与临界压力，所以在最近火力发电厂的锅炉用得很多。

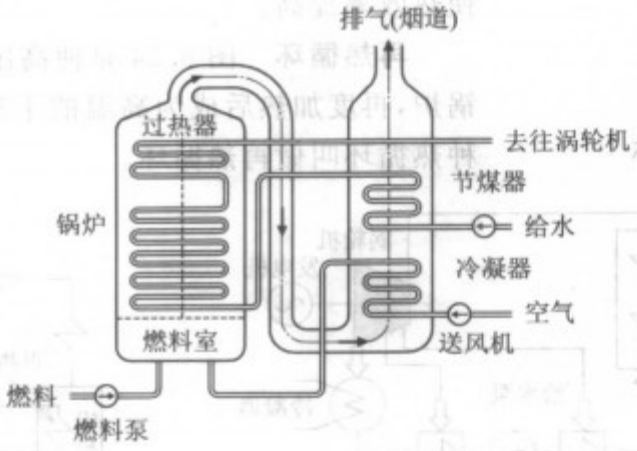


图 8.26　贯流式锅炉

蒸汽涡轮机

蒸汽涡轮机将蒸汽具有的热能转变为机械能。按照蒸汽作用的不同，有利用高温、高压蒸汽冲击叶片的冲击力而旋转的冲动式；有利用中压、低压蒸汽吹在旋转叶片又离开的反动力而旋转的反动式。最近的涡轮机，则是将两者合并使用的冲击反击式涡轮机(见图8.27)。

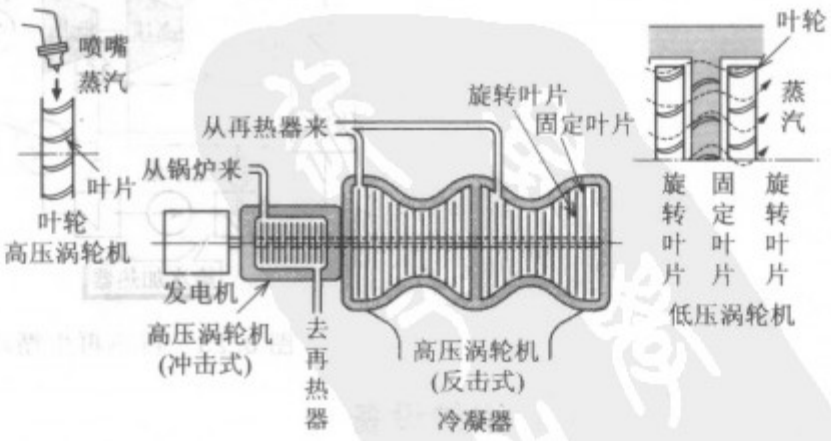


图 8.27　冲击反击式涡轮机

涡轮发电机

使用在涡轮发电机横轴的有2极或4极的旋转磁场型三相同步发电机。2极的转速是3000r/min(50Hz)或

3600r/min(60Hz)。发电的电压多采用 11kV、22kV、33kV。

热计算图

热计算图

将发电厂的输入、输出与损耗的关系用热能移动图表示，叫做**热计算图**，见图 8.28。它表示假设燃料具有的能量为 100%，变换到发出电为止，热量的吸收、损耗及回收等，用于有效地利用燃料。

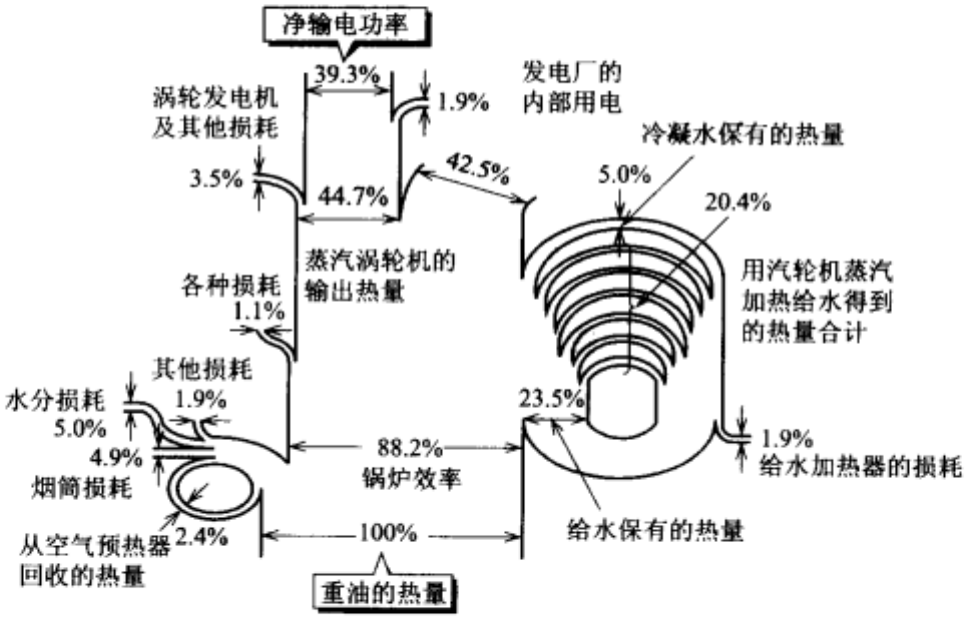


图 8.28 蒸汽力发电厂的热计算图例

例 题

1 某蒸汽力发电设备。发电机的输出功率是 18MW，蒸汽涡轮机的输出为 20MW，使用蒸汽量是 80t/h，在蒸汽涡轮机的进口蒸汽焓为 3 550kJ/kg，运行时冷凝器入口的蒸汽焓为 2 450 kJ/kg，求发电机效率(%)及涡轮机的效率(%)。

提示 画出本题的热计算图，如图 8.29 所示。

答 (1) 发电机的效率是发电机的输出 P_G(MW)与涡轮机输出 P_T(MW)之比，即

$$\eta_i=\frac{P_G}{P_T}\times 100\%=\frac{18}{20}\times 100\%=90\%$$

(2) 假设使用的蒸汽量为 Z(t/h)，蒸汽涡轮机入口蒸汽的焓 i_1(kJ/kg)，冷凝器入口蒸汽的焓 i_2(kJ/kg)，涡轮机的效率是 η_T(%)，即

$$\eta_T = \frac{P_T \times 10^3(\text{kJ/s}) \times 3600(\text{s/h})}{Z \times 10^3(\text{kg/h}) \times (i_1 - i_2)(\text{kJ/kg})}$$

$$= \frac{20 \times 10^3 \times 3600}{80 \times 10^3 (3550 - 2450)} \times 100\% \approx 82\%$$

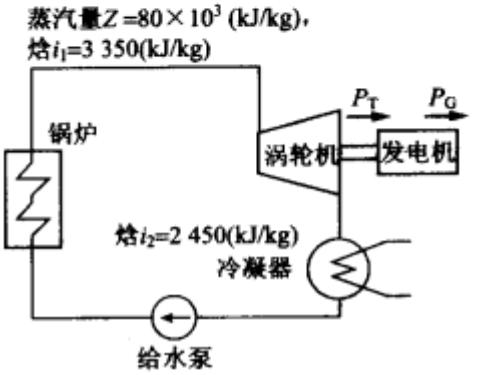


图 8.29　热循环

4 原子能发电

要点

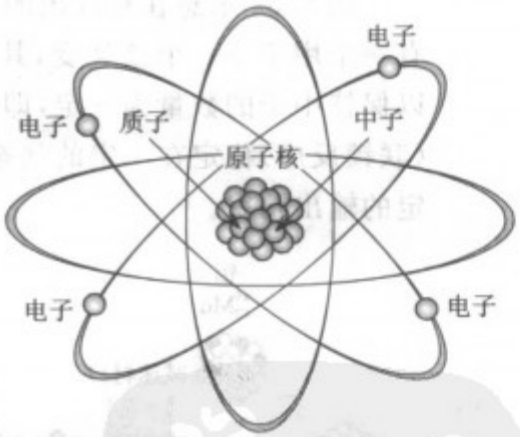
原子能发电是使浓缩铀等核燃料在原子反应堆内发生核裂变，用反应产生的大量热能产生高温、高压的蒸汽，使涡轮机旋转发电。

解释

铀原子与铀燃料

铀的原子核中有92个质子，因此原子序数为92。但是天然存在着具有142个、143个及146个中子的类别。这种质子的数量相同而中子数不同的物质叫做**同位素**（见图8.30）。

同位素



	质子数	中子数	质子数与中子数之和	自然界里存在的比例
铀234	92	142	234	0.0055%
铀235	92	143	235	0.7200%
铀238	92	146	238	99.2745%

图8.30 铀原子的构造

在天然铀里只含有0.7%左右容易裂变的铀235。原子能发电（轻水反应堆）是将其浓缩成3%～5%的浓缩铀，烧结成小颗粒并封在锆合金的被覆管内作为燃料使用。剩余的95%～97%是不容易裂变的铀238（见图8.31）。

核裂变与控制

铀235吸收中子发生裂变时，分裂成钼和镧，放出2～3

个中子，同时释放出热能。

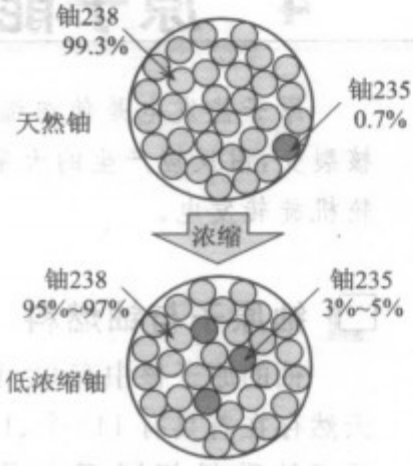


图 8.31 天然铀与浓缩铀

图 8.32 示意在释放出的 2～3 个中子当中，如果能控制有一个用于下一个核裂变，其余的中子被控制棒吸收，就可以保持中子的数量为一定，即可以使单位时间内核裂变反应（联锁反应）稳定在一定的状态（临界状态），即核反应堆有稳定的输出功率。

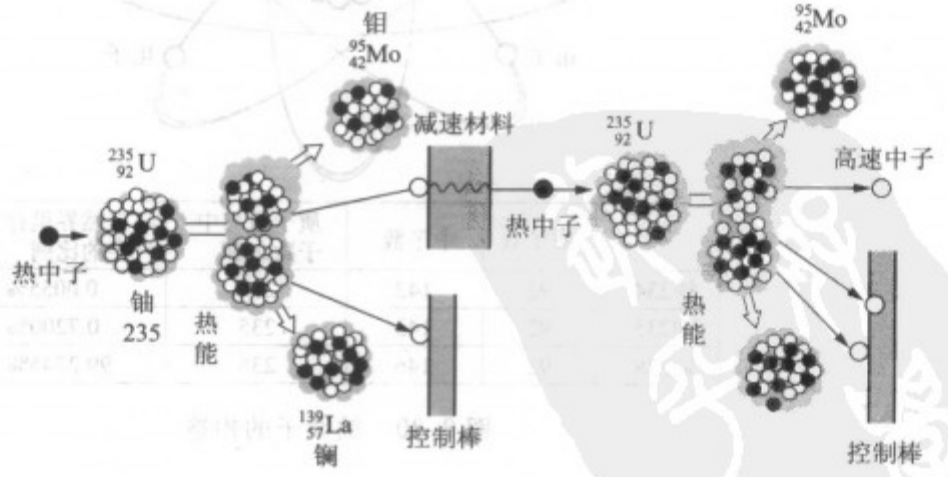


图 8.32 核裂变与控制

核反应堆的原理及构成要素

能够取出核裂变产生的热能并加以利用的装置叫做核反应堆。图 8.33 表示核反应堆由核燃料、减速材料、冷却介质、控制棒、反射材料、屏蔽材料等构成。

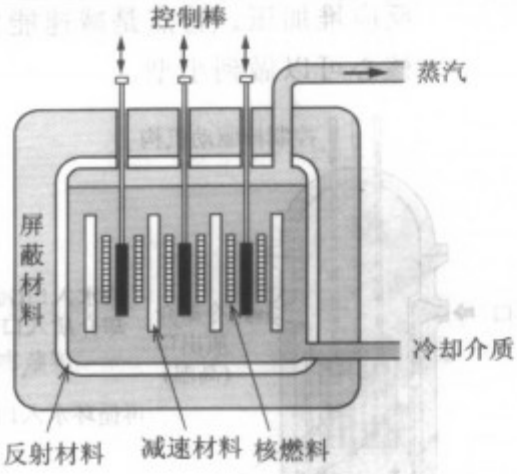


图 8.33 核反应堆的构成

用热中子进行核裂变反应的核反应堆叫做热中子反应堆，用高速中子的核反应堆叫做高速中子反应堆。

发电用核反应堆的种类

表 8.3 是核反应堆的种类，分别列出了发生核裂变的燃料、使用的减速材料，以及从反应堆中心取出热量的冷却材料等。

表 8.3 核反应堆的形式与构成材料

形 式	燃 料	减速材料	冷却介质
轻水反应堆	浓缩铀	轻水	轻水
重水反应堆	天然铀 浓缩铀	重水	二氧化碳、轻水
气体冷却反应堆	天然铀	石墨	二氧化碳
气体冷却反应堆(改良型)	浓缩铀	石墨	二氧化碳
高温气体反应堆	浓缩铀	石墨	氦
高速增殖反应堆	浓缩铀与钚混合	无	钠、钠钾合金

使用轻水(普通水)兼作减速材料和冷却材料的是轻水反应堆，以浓缩铀为燃料。在世界上轻水反应堆是原子能发电的主流，按照产生蒸汽形式的不同分为加压水型(PWR)(见图 8.34(a))与沸腾水型(BWR)(图 8.34(b))。

加压水型反应堆(PWR：Pressurized Water Reactor)

图 8.35是使用轻水作为冷却材料及核反应堆压力容器减速材料的反应堆。为了使内部的轻水不沸腾，用加压器给整个

反应堆加压。特点是减速能力强，热传递特性好。反应堆的核心可以做到小型。

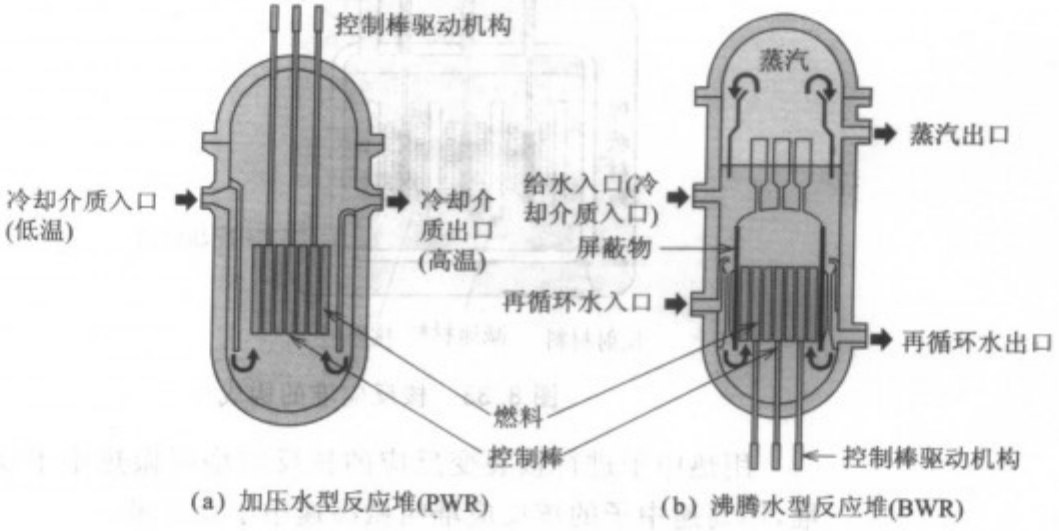


图 8.34　核反应堆压力容器断面(资源能源厅《原子能 2004》)

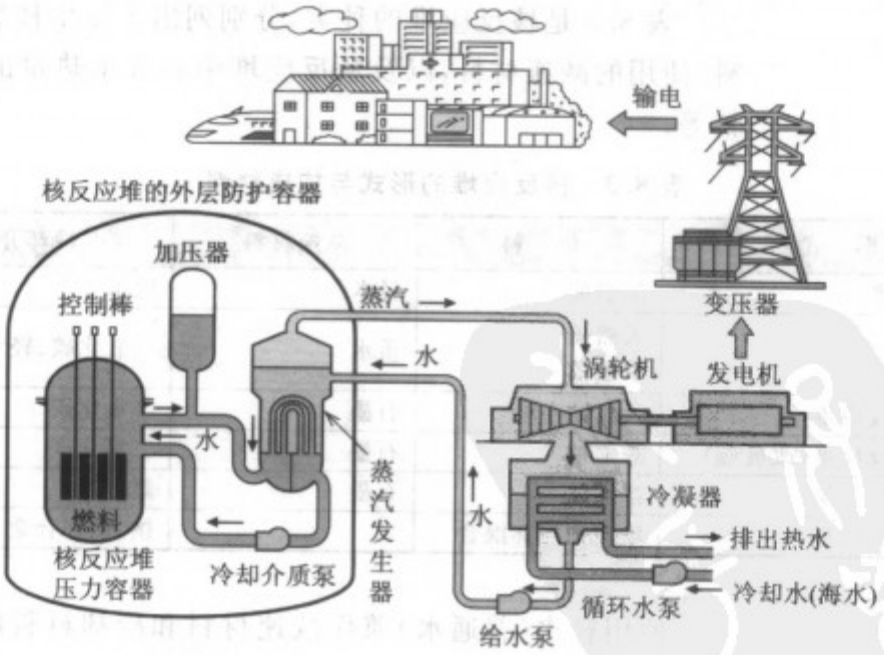


图 8.35　加压水型反应堆(PWR)发电(电气事业联合会原子能文化振兴财团)

沸腾水型反应堆(BWR:Boiling Water Reactor)　图 8.36 在反应堆内使作为冷却介质的轻水沸腾，取得蒸汽后直接送往蒸汽涡轮机。由于不用热交换器，系统简单，热效率高。反应堆核心的耐压能力可以比 PWR 型的低，因此经济性好。

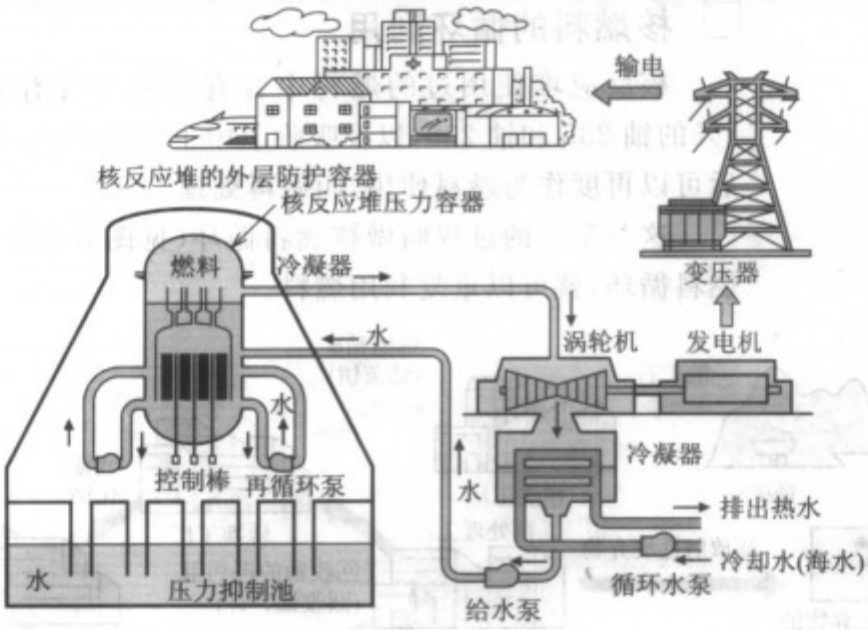


图 8.36 沸腾水型反应堆(BWR)发电(电气事业联合会原子能文化振兴财团)

快中子增殖(FBR:fast breeder reactor) 图 8.37 表示快中子增殖反应堆的构成。快中子增殖反应堆的特点是生产出的燃料(钚)比消耗的燃料更多,即反应堆的转换比在 1 以上。

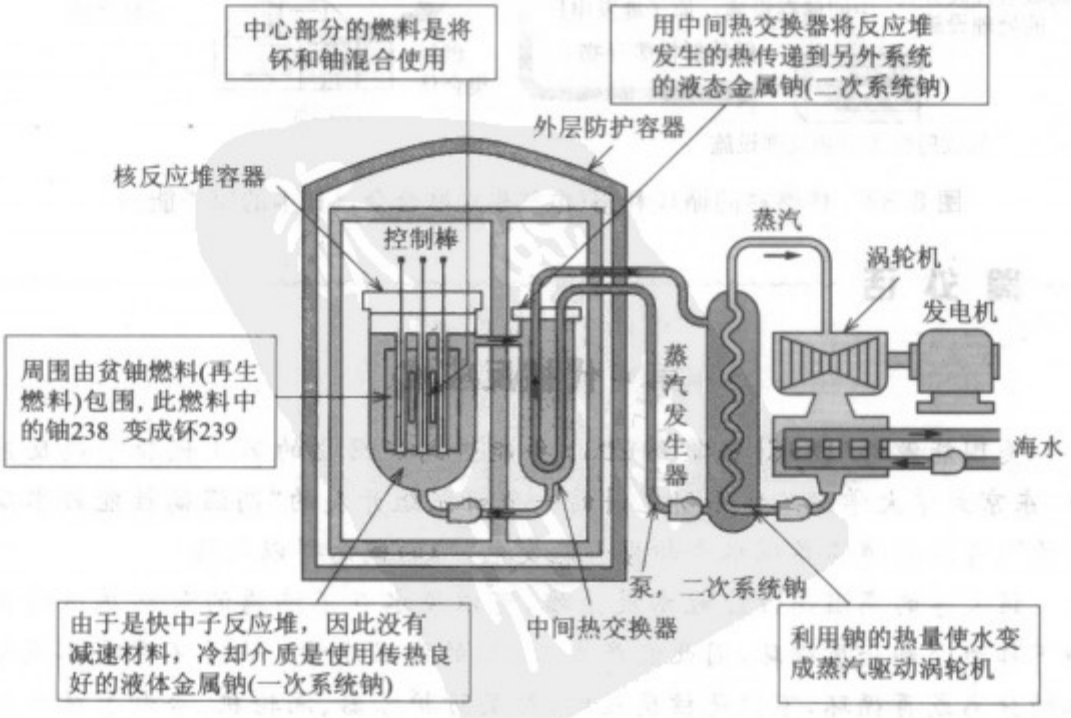


图 8.37 快中子增殖反应堆(FBR)的构成(电气事业联合会原子能文化振兴财团)

核燃料的循环利用

核反应堆使用过的燃料中含有裂变后含有率约减少1%的铀 235 和铀 238，以及吸收了中子的钚 239。将其分离后可以再度作为燃料使用，叫做**再处理**。

再处理

这一系列的过程叫做核燃料循环(见图 8.38)。依据核燃料循环，就可以重复利用燃料。

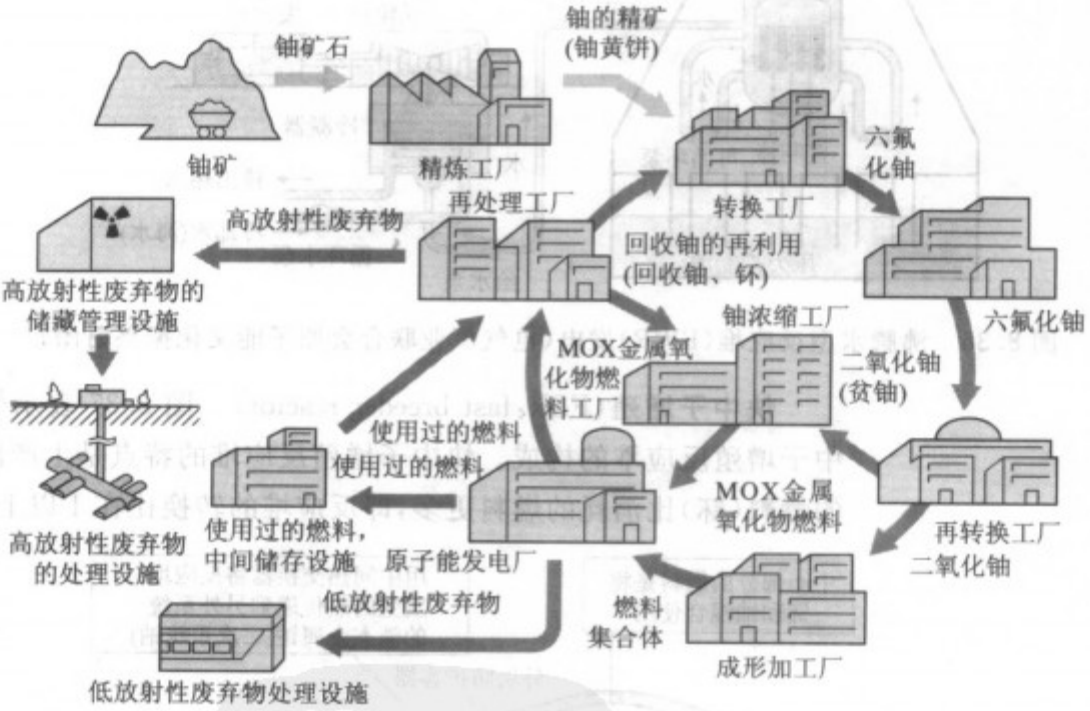


图 8.38　核燃料的循环利用(电气事业联合会，《日本的原子能》)

篇外话

第 4 代核反应堆

美国能源部(DOE)征集到 2030 年能达到实用化的第 4 代原子能反应堆，东京大学大学院工学系研究科的一个研究组开发的“高温高性能轻水反应堆”(贯流型超临界压水冷却原子能发电厂)的概念得以入选。

该大学的高温高性能轻水反应堆，可以使水在不沸腾的超临界压的状态下作为冷却介质循环，因此能产生 500℃的高温能量。由于不需要蒸汽与水的分离或再循环，不仅是核反应堆，外层防护容器、涡轮机、冷却系统都能做到小型、简单，发电效率也提高到 44%。

5 特殊发电

要 点

从资源的有效利用及环境问题的观点来看，今后应该加强研究开发利用天然能量的发电，同时也可以增加发电量。

在本节以太阳光发电、风力发电、地热发电，以及燃料电池为例进行说明。

解 释

太阳光发电

太阳光发电的原理 图 8.39 表示当太阳光照射在用硅等制成的 p 型半导体与 n 型半导体的结合面时，由于光电效应而产生自由电子与空穴。自由电子向 n 型半导体移动；空穴向 p 型半导体移动，p 型半导体的一侧带正电；n 型半导体的一侧带负电。

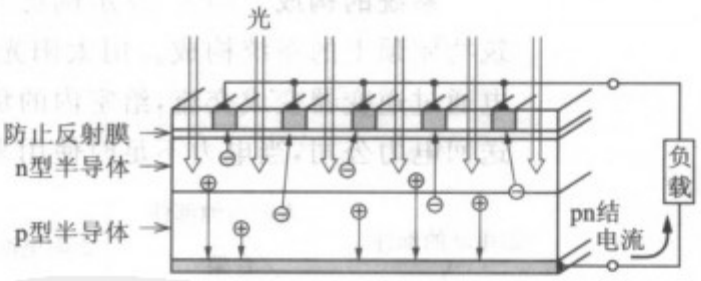


图 8.39 太阳光发电的原理

从光到电的变换效率，单晶硅一般是 10%～12%。如果效率是 100%，则在夏天时，在太阳光照射每 $1m^2$ 发的电功率最大约 100W。

太阳光发电的特点 太阳光发电有表 8.4 所示的优点和缺点。太阳光发电的规模从小到大，可适应多种需求。

表 8.4 太阳光发电的优、缺点

优 点	缺 点
(1) 能半永久性的利用，不像石油化工燃料会耗尽 (2) 没有排出物 (3) 与发电的规模无关，发电效率相同 (4) 能靠近需要电力的场所设置	(1) 要得到大电力需要大面积 (2) 夜间或雨、雪等天气影响发电量 (3) 需要蓄电设备或直流-交流变换装置，要投入设置费用

太阳光发电器件　表8.5列出能制造的各种太阳光发电器件。可按使用方法及使用目的区分。随着发电效率高、价格低、抗老化器件的开发，可预见今后的需求将增加。

表8.5　太阳光发电器件的种类与特点

半导体的种类	非结晶型	单　晶	多　晶	化合物半导体
变换效率/%	6～9	15～16	12～13	6
用途	计算器、电子表等民用	宇宙用、电力用	民用	宇宙用
特点	·蒸附在玻璃表面 ·可小型化 ·可大量生产	·使用掺杂的硅片 ·发电效率高	·容易大量生产 ·比单晶硅价廉	·超高效率(30%～40%) ·可做到小型、轻量化
面临问题	·效率低 ·日照强度影响发电功率	·生产成本高	·比单晶硅的效率略低	·价格高 ·重 ·容易破碎

系统的构成　图8.40示例将太阳光发电器件设置在建筑物屋顶上的系统构成。用太阳光发电器件将发出的直流电通过逆变器变成交流，给室内的负载供电。剩余的电力反送回电力公司，当电力不足时使用来自电力公司的电力。

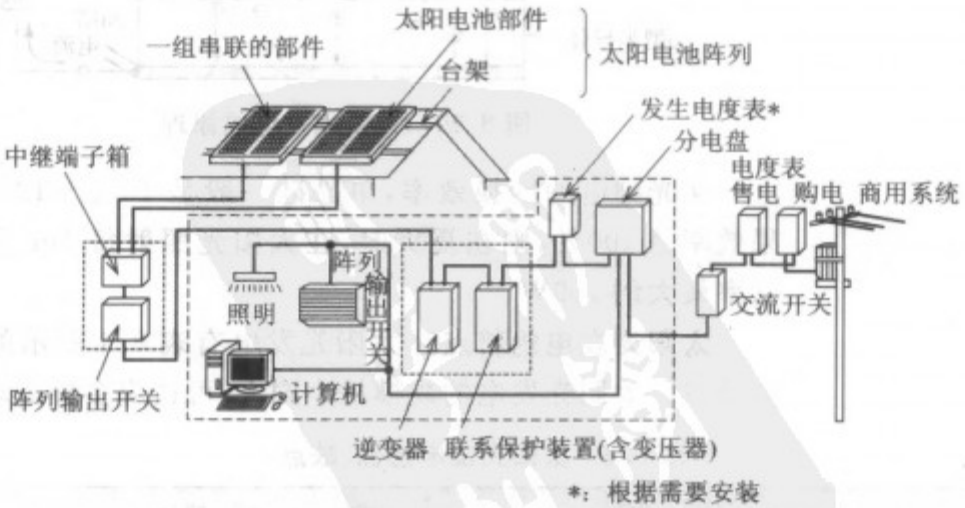


图8.40　太阳光发电系统的构成

风力发电

风力发电的原理　图8.41是风力发电的原理，靠风推动风轮使发电机旋转。适合设置发电机的场所是全年风力

应该在6～7m/s以上，但是风轮等设备能够经受微风到强风的变化，而且必须是适应风力的构造。图8.42表示为适应设置场所或不同风力开发的各种形式的风轮。

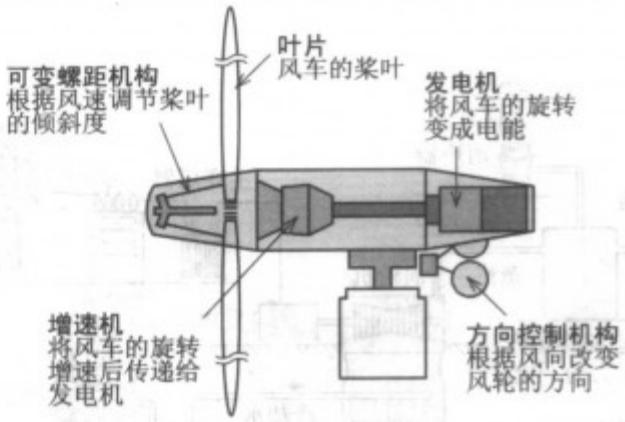


图8.41 风力发电的原理(电气事业联合会)

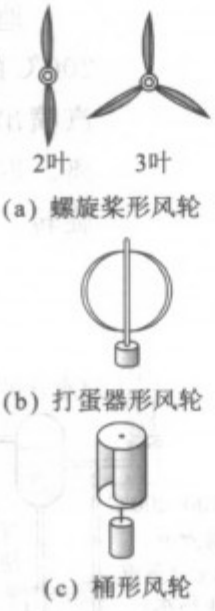


图8.42 风 轮

风力发电的特点 风力发电的优点和缺点见表8.6。

表8.6 风力发电的优点和缺点

优 点	缺 点
(1) 取之不尽 (2) 发电时没有排出物	(1) 要得到大电力需要大设备 (2) 风轮旋转时有低频噪声 (3) 设备费用高，成本高

风力发电的设置状况 表8.7是电力企业的主要风力发电设备的设置状况。计划今后还要设置更多。

表8.7 电力企业的风力发电设备统计

电力企业名	设置地点	输出功率×台数
北海道电力	北海道	275kW×2　300kW×1
东北电力	青森县	275kW×5　300kW×5
冲绳电力	冲绳	250kW×2　400kW×3　500kW×1 600kW×1　250kW×2　280kW×1 300kW×1　500kW×2

地热发电

地热发电概述　地热发电是利用被岩浆加热的地下水及蒸汽，驱动涡轮机旋转发电的方式。

地下井是从300～2 000m深度的蒸汽井取出100～200℃的热水或蒸汽。如图8.43所示，每一口蒸汽井的蒸汽喷出量是20～200t/h，用汽水分离器将热水与蒸汽分离。取出蒸汽后，将蒸汽压力提高到4kg/cm²，驱动涡轮机旋转。

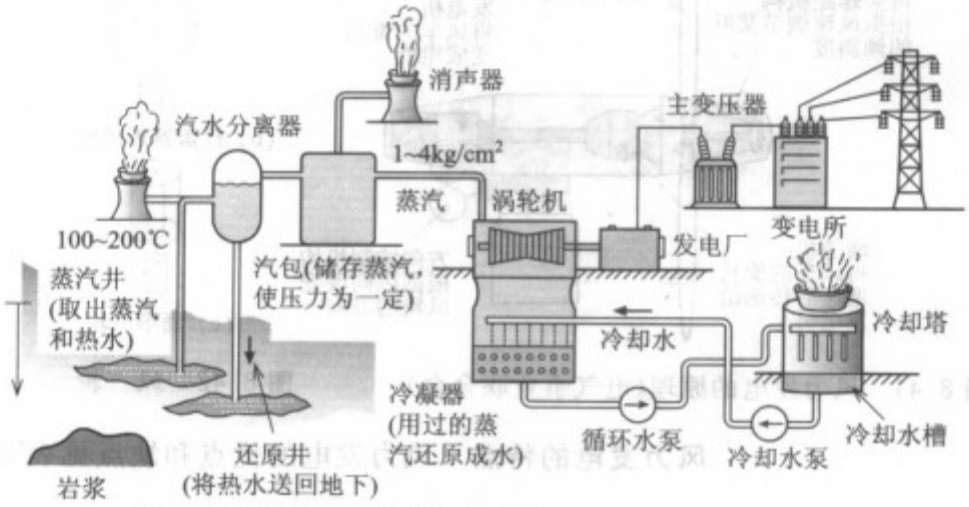


图8.43　地热发电

涡轮机排出的废汽在冷凝器变成温水。因此时体积变小，管中的气压变低，蒸汽再度膨胀，可提高涡轮机的效率。

地热发电的特点　地热发电与蒸汽力发电比较，蒸汽压力及温度都低，因此效率差，单机的发电容量也小，建设单价高。但其优点是不需要燃料，机器的结构也简单。

地热发电站的设置举例，表8.8是地热发电设备的设置状况。

燃料电池

燃料电池发电的机理　燃料电池发电是应用电解水的

表8.8　地热发电设备的设置状况

电力企业名	设置地点	输出功率
北海道电力	森	50000kW

续表 8.8

电力企业名	设置地点	输出功率
东北电力	葛根田 1、2 号机(岩手)	80000kW
	柳津西山(福岛)	65000kW
九州电力	八丁原 1、2 号机	110000kW

反原理。图 8.44 表明在电解质中插入 2 条电极，分别输送氢和氧，于是发生化学反应，直接变成电能发电。

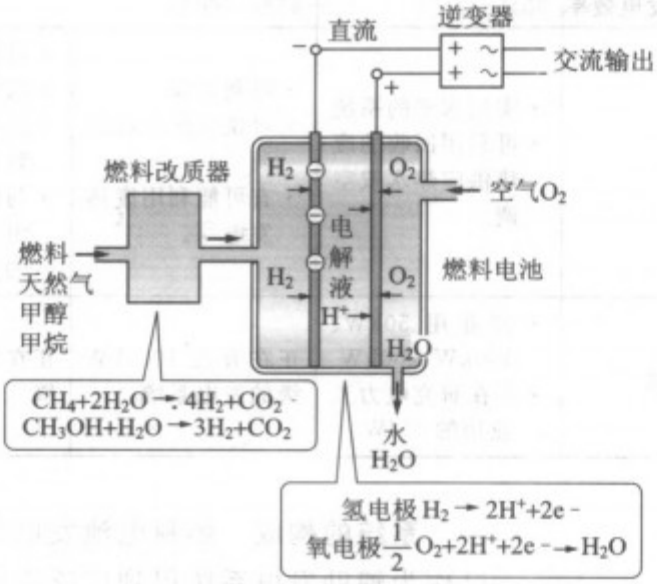


图 8.44 燃料电池发电的概念(磷酸型)

燃料电池发电的特点 燃料电池发电的优、缺点示于表 8.9。

表 8.9 燃料电池发电的优点及缺点

优 点	缺 点
(1) 完全不产生 SO_x(硫氧化物)，也几乎不产生 NO_x(氮氧化物) (2) 发电时的噪声小，能全自动运行 (3) 因为是直接发电，发电效率高	(1) 电池的耐久性差 (2) 系统的可靠性低 (3) 设备费用高，成本高

燃料电池的种类及特征 燃料电池与太阳电池等有同样优良的环境适应性，发电效率约 55%。在与有效利用废热设备合并使用的场合，总效率可以提高到 80%左右。表 8.10是燃料电池的种类及特征。

表 8.10　燃料电池的种类及特征

项目	磷酸型（PAFC）	熔融碳酸盐型（MCFC）	固体电解质型（SOFC）	固体高分子型（PEFC）
电解质	磷酸水溶液	碳酸盐	稳定化氧化锆	高分子电解质膜
工作温度	150～220℃	600～770℃	900～1000℃	600～1000℃
燃料	天然气、甲醇、液化石油气、挥发油、煤油	天然气、甲醇、液化石油气、挥发油、煤油、煤炭		氢气、天然气、甲醇、液化石油气
系统的发电效率	35%～45%	45%～60%		35%～45%
特点	·实用水平的系统 ·可利用回收的废热供应热水或空调	·可利用煤 ·可供应热水或空调 ·有可能利用废热发电	·可利用煤 ·高发性电力密度 ·高性能而且能作到可携带化 ·与微型燃气轮机组合可得到更高的发电效率	·高输出功率、高密度 ·寿命长 ·不利用热量 ·利用氢燃料
开发状况	·商业用 50kW、100kW、200kW ·正在研究电力工业用的 5MW	正在开发 1000kW 级的发电系统	正在开发数十千瓦级	燃料电池汽车，正在开发 1kW 的组件

系统的构成　燃料电池发电装置示例于图 8.45。现在已作为辅助发电系统得到广泛应用。

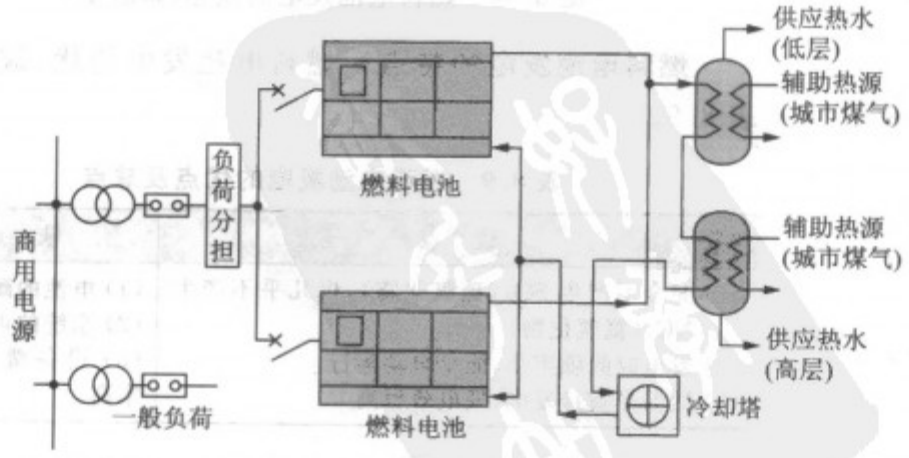


图 8.45　燃料电池发电系统（电气工事讲习中心）

一个燃料电池单元由燃料改质系、电池系、电力变换系、控制系、辅机配管系构成。利用负荷分担装置来控制两套燃

料电池的负荷均等，使用城市煤气作为辅助热源来供应热水。

此外，燃料电池本身的排热也可以利用作为供热水槽的热源。

燃料电池发电的设置状况 表 8.11 是电力企业主要燃料电池发电的设置状况。

表 8.11 燃料电池发电的设置状况

电力企业名	设置地点	输出功率	形式
东京电力	技术开发中心(神奈川)	200kW	磷酸型
	技术开发中心(神奈川)	3kW	固体高分子型
中部电力	神城变电所(长野)	50kW	磷酸型
九州电力	新小仓发电所(福冈)	50kW	磷酸型

最有进展、达到实用化的是磷酸型开发已告完成，但设备成本高，是现有火力发电设备的 4～5 倍。今后的课题是还要改善长期工作的可靠性。此外，PEFC 是小容量，正在走向实用化。

6　能源的有效利用与环境对策

要　点

人们在有效利用有限的石油化工燃料的同时，正在考虑环境问题。因此要放眼地球的未来，研究能源供应系统或发电方式。在本节说明有效利用能源的技术概况，以及现在正研究的发电方式。

解　释

能源需求的现状

1960年以后，日本的经济高度增长带来大幅度的能源需求。但以第2次石油危机为转机，为了改变供应结构的脆弱性，开始致力于降低对石油的依赖程度。表8.12显示了提高利用效率后，天然气或原子能的比例减少。

表8.12　一次能源供应的估计(单位:换算成百万kL原油)

项目＼年度	1990年度		2000年度		2010年度			
					基准情况		目标情况	
一次能源供给	526		604		622		602程度	
按能源种类区分	实际数	构成比/%	实际数	构成比/%	实际数	构成比/%	实际数	构成比/%
石油	306	58.3	313	51.8	280	45.0	271	45
煤炭	87	16.6	108	17.9	136	21.9	114	19
天然气	53	10.1	79	13.1	82	13.2	83	14
原子能	49	9.4	75	12.4	93	15.0	93	5
水力	22	4.2	21	3.4	20	3.2	20	3
地热	1	0.1	1	0.2	1	0.2	1	0.2
新能源等	7	1.3	7	1.1	10	1.6	20	3
可再生能源①	29	5.6	29	4.8	30	4.8	40	7

① 在可再生能源中，包括新能源、水力及地热。(经济产业省)

对地球环境问题的考虑

人们对于二氧化碳引起全球暖化、酸雨、臭氧层的破坏、沙漠化等地球环境问题的日益关心，并根据依然靠石油化工燃料供应电力的现状，认为有必要强化供、需两方面的对策。

1994年制定了“新能源导入大纲”，开始导入以下新的能源：

可再生能源 太阳电池发电，太阳热发电，风力发电等。

可循环利用型能源 垃圾发电等。

传统型能源的新利用形态 辅助发电系统，联合发电，燃料电池，清洁能源汽车等。

为了实现在防止全球变暖的京都会议上通过的京都议定书(1997 年 12 月)的目标值，还要期待今后作为新能源的太阳电池或燃料电池，风力发电，辅助发电系统或联合发电系统得到普及。

辅助发电系统

辅助发电系统(CGS)是供电又供热的系统，即从发电机发出电力的同时，还回收从原动机排出的气体或冷却水的热量，用作取暖空调或供应热水。这是有效地利用了石油化工燃料能源的系统，在国家与民间企业中正在积极开发和导入。所使用的原动机是燃气轮机、柴油发动机、煤气发动机等。

辅助发电系统概述

燃气轮机系统 用石油类的燃料驱动燃气轮机发电，并将尾气导入排气锅炉，可利用作为取暖空调或供应热水。发电效率是 15%～28%，综合效率 65%～75%。燃气轮机系统示例于图 8.46。

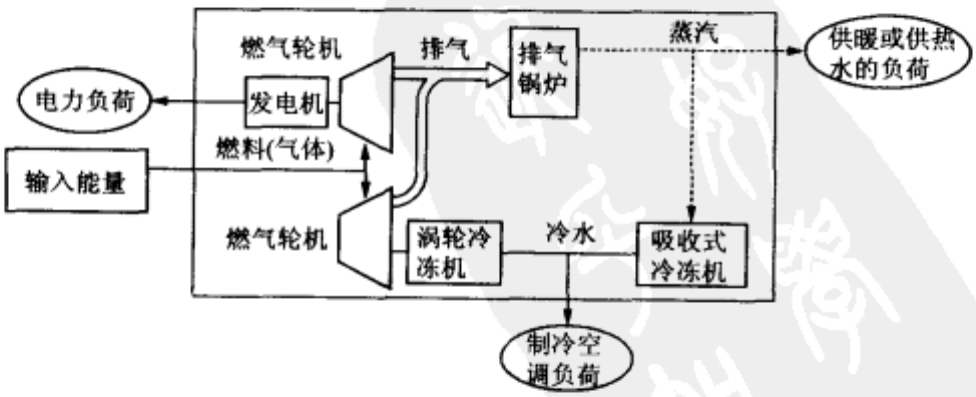


图 8.46 燃气轮机系统示例

柴油发动机系统 从柴油发动机排出的尾气通过排热锅炉，回收物是蒸汽或热水，缸套内的冷却水经过热交换器之后成为热水回收，可利用作为取暖空调或供应热水。发电

效率是 35%～40%，综合效率是 70%～75%，比燃气轮机高。柴油发动机系统示例于图 8.47。

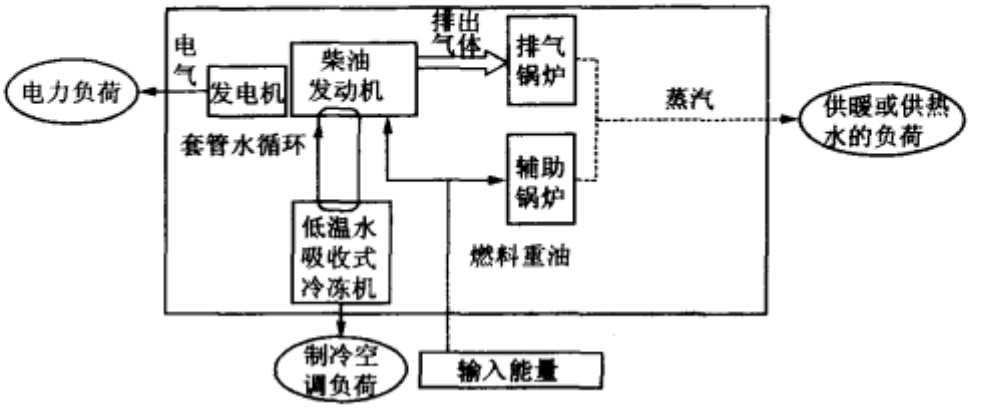


图 8.47　柴油发动机系统示例

煤气发动机系统　热量回收是利用冷却水或排气进行，所以系统的构成与柴油发动机系统大致相同。发电效率是 27%～40%，综合效率是 65%～85%。

辅助发电系统与电网系统联合　为了把辅助发电系统设备或太阳电池发电等的自家用的发电设备与电力企业的商用电力系统并网，1986 年 8 月制定了系统并网技术要件的基本原则，经过数次修订后实行。

并网的基本原则　考虑的内容如下：

① 在供电的可靠性，电力质量（电压、频率、功率因数）等方面，不能影响其他用户。

② 不能影响公众及作业者的安全，不能损及电力供应设备及其他用户的设备。

能并网的小功率发电设备　电压在 600V 以下的，以及同一区域内设置的小功率发电设备，是指以下①～④的内容。但输出功率合计在 20kW 以上时，不作为小功率发电设备对待：

① 太阳电池发电设备输出功率不满 20kW 的。

② 风力发电设备输出功率不满 20kW 的。

③ 水力发电设备输出功率不满 10kW 的（带有水坝的除外）。

④ 以内燃力为原动力的火力发电设备输出功率不满

10kW 的。

因此，所谓一般用电工作对象主要是一般住宅或商店等的电气设备，用低压电 100V、200V 的设备及小功率发电设备。

利用自然能的发电方法，以及现在开发研究中的发电设备

海洋发电 日本有世界上屈指可数的漫长海岸线，有得天独厚的能利用海洋能量（潮汐、波浪、海洋温度差、水深压力）的环境，作为不排出废弃物，而且是永恒清洁的能源很引人注目。

潮汐发电 利用满潮与干潮海面水位差的发电方式。满潮时海水通过水坝闸门流入储水池，干潮时使海水从储水池流回大海。海水流入、流出时带动可逆式圆筒水轮机旋转发电。在法国有 240MW 的潮汐发电站在运行。

波浪发电 利用海面的上、下运动或将浮体的摇摆运动变成旋转运动的方法，用空气涡轮机旋转力的发电方式。在日本山形县附近的海上有 125kW 的发电装置正在实验运行中。

海洋温差发电 海洋的表层水由于日晒被加热到 20℃以上，但深海的温度为 4～7℃。尤其是在日照强烈的赤道附近，时常可达到 20℃以上的温差。利用热机在常温附近使用蒸汽压力高的低沸点介质（氨、氟利昂等），有可能得到巨大的输出功率。通过实验工厂正在做实证阶段的运行。

热泵 储存变电站或工厂及城市的排热或废热，用于房屋的冷暖空调。预先将热量储存在蓄热槽之后使用的蓄热式热泵是以电为动力源，相对于电能为 1，可以得到 3 以上的热能。另外还可以利用夜间的廉价电力，在需要制冷空调的夏季将冷水蓄积在蓄热槽里；在冬季则蓄积热水用于白天房间取暖。

液化天然气冷热发电 将－162℃的液化天然气复原为气体时，利用其体积膨胀了 600 倍来驱动发电用的涡轮机，然后还能作为火力发电厂的燃料使用，是有效利用能源

的发电系统。现在有 8 800kW 的工厂在运行。

COM 及 CWM　COM(煤、油混合燃料)是将煤微粉末化之后,与重油和添加剂混合成的液体燃料以代替石油;CWM(煤浆)是以水(或空气、蒸汽)为媒体来代替重油,这一项目正在研究开发之中。这些方法在运输及储存方面有可能与处理重油相似。

篇外话

导入新的能源

制定了新能源的导入目标之后,在发电领域就有必要为达到此目标对不同的导入阶段提供支持,为此把"RPS"制度法律化。这就是 2002 年 6 月公布的《关于电气事业者利用新能源的特别措施法则》。

RPS 制度(Renewable Portfolio Standard)是为进一步促进新能源普及的制度,基于《关于电气事业者利用新能源的特别措施法则》,电气事业者在每个年度要根据其销售的电能,有义务按照一定的比例利用新的能源发电,以谋求新能源进一步普及。

以下是 5 种新的能源:

① 太阳能发电。

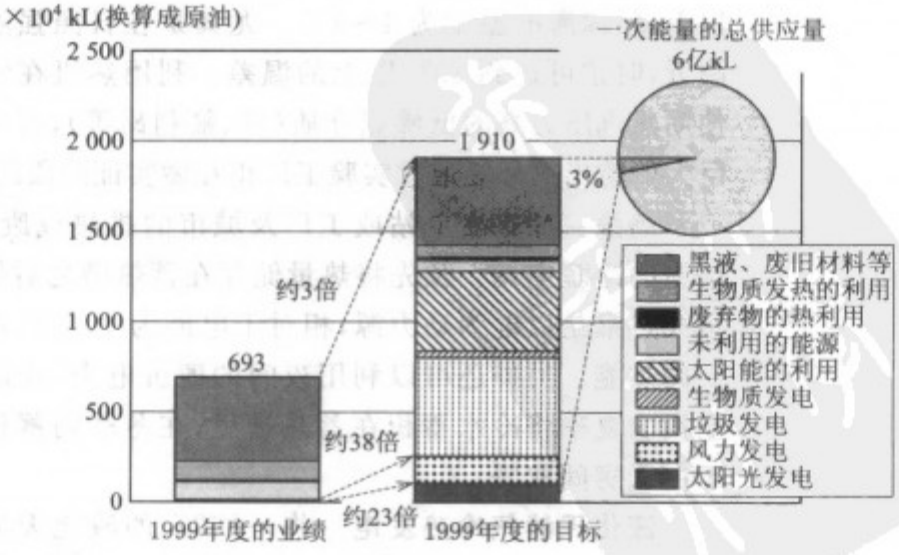


图 8.48　导入新能源的业绩与目标(综合资源能量调查会综合部会及需给部会报告书(2001 年 7 月))

② 风力发电。

③ 地热发电。

④ 生物质发电。

⑤ 中、小水力发电(水道式,1 000kW 以下的水力发电)。

图 8.48 是导入新能源的业绩与目标。

所谓生物质能,是指将来自动、植物的有机物作为能源加以利用(原油、石油气、可燃性天然气及煤炭,以及由此制造的制品除外),还包括将生物质能作为热源产生的热,或利用燃烧生物质能垃圾的发电。

7　电力系统

要　点

电力系统是指从发电到用户一系列的系统，构成系统的设备有发电厂、输电线、变电所、配电线等。电力系统为了将质量好的电力安全有效地输送给用户，必须有经济、可靠的传输系统。

解　释

电力系统的构成

图 8.49 表示电力系统的构成。由水力、火力、原子能发电厂等发出的电力在发电厂的变压器升压到 154～500kV 后，由一次输电线送往接近用户的一次变电所。在一次变电所将电压降低到 66～154kV，在靠近城市街道地区的二次变电所降低到 22～66kV，在配电用变电所降低到 3.3～6.6kV。对需要高压的用户直接送高压；对低压用户使用杆上变压器降低到 100～200V 后入户。**输电线路**是指连接发电厂与变电所之间的线路，**配电线路**是指从配电用变电所直接把电力送给用户的线路。这一系列的输电、配电系统称为**电力系统**或**输、配电系统**。

输电线路
配电线路

电力系统
输、配电系统

输电电压

随着电力需要的增加，必须升高输电电压以增加电力的供应量。此外也是为了输电电压升高后可以减少输电损耗。现在日本最高的电压已经上升到 500kV，为了适应电力需要的增加，正逐步建设设计为 1 000kV 的 UHV 输电线，现在已开始用 500kV 运行。UHV 输电线在将来的输电系统中将起重要的作用。

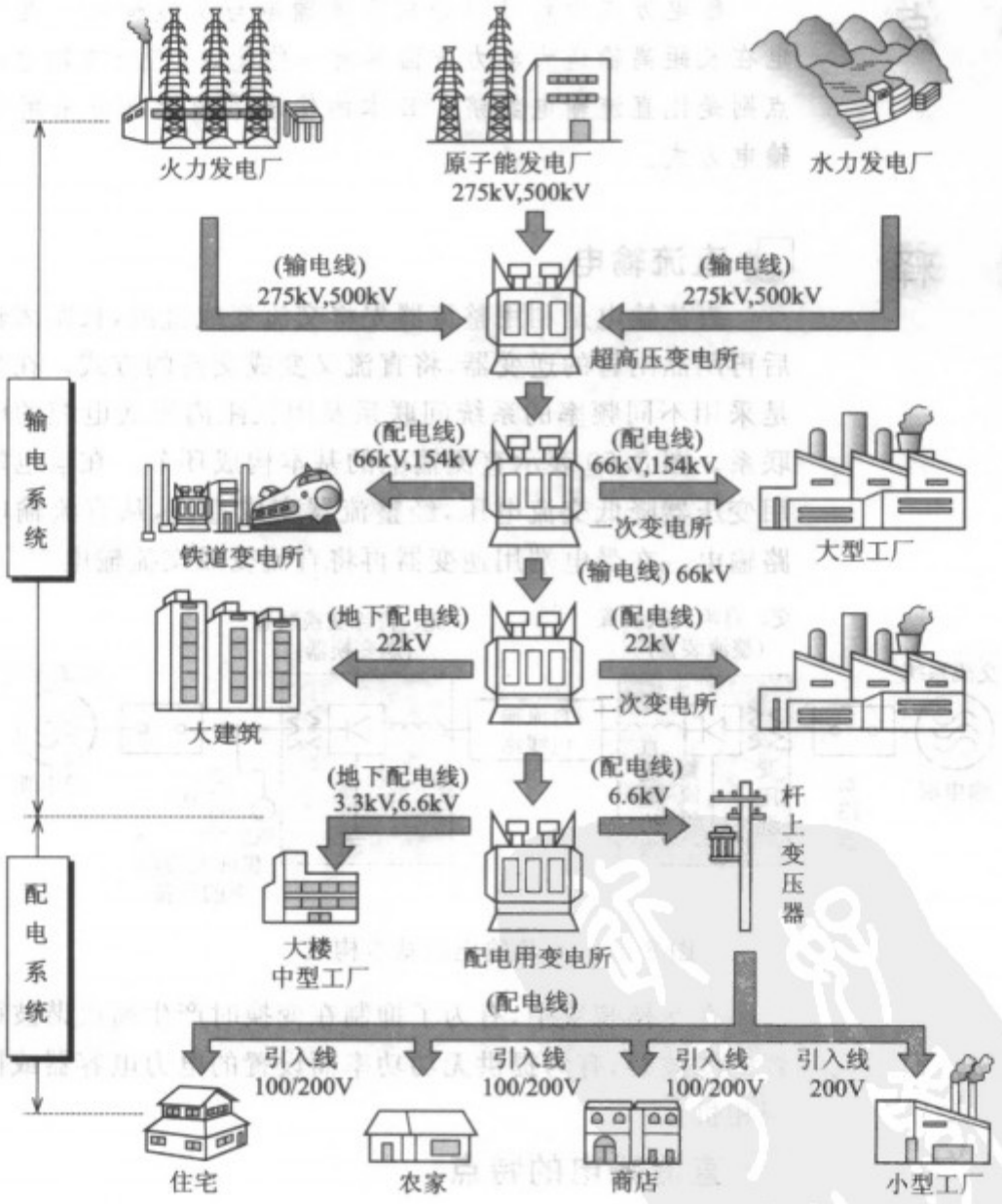


图 8.49 电力系统的构成

8　直流输电与交流输电

要　点

输电方式大致可以分成直流输电与交流输电。直流输电在长距离输送大电力方面具有一些优点，但交流输电的优点则是比直流输电经济。日本的输电系统大部分采用交流输电方式。

解　释

直流输电

直流输电是利用整流器先将交流变成直流，长距离输电后再用晶闸管的逆变器，将直流又变成交流的方式。在日本是采用不同频率的系统间联系及用长距离海底电缆的电力联系。图8.50表示直流输电的基本构成环节。在输电端先用变压器降低交流电压，经整流器变成直流，从直流输电线路输电。在受电端用逆变器再将直流变成交流输电。

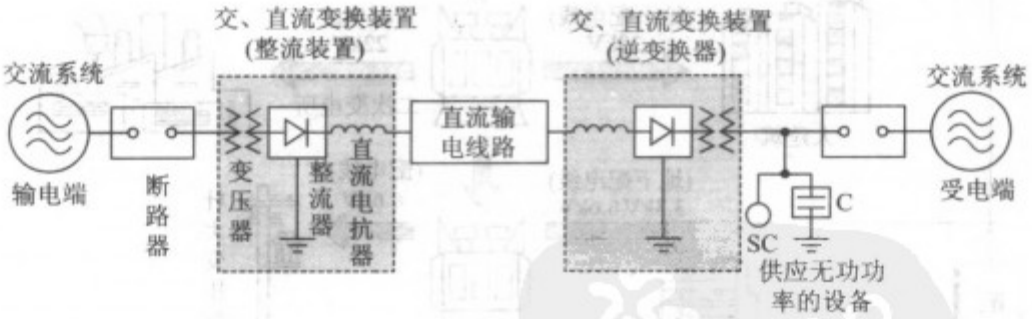


图8.50　直流输电的基本构成

在变换装置中，有为了抑制在变换时产生高次谐波而设置的滤波器；有为提供无功功率而设置的电力电容器或同步调相机。

直流输电的特点

(1) 优点

① 直流电压与交流电压比较，如果输送的功率相同，有效值都是V时交流电压的最大值是$\sqrt{2}V$。因此直流输电线路更容易绝缘，适于用电缆输电。

② 可以连接不同频率的电力系统。

③ 在长距离、大电流输电时没有稳定性的问题，因此输电可以达到电线容许电流的限度。

④ 直流电没有无功功率的问题，电压降、功率损耗、电压变动率也小。

⑤ 直流输电用 2 条导体即可(交流输电用 3 条)。如果以大地作为回路，1 条也可以输电。可以降低输电线路的建设成本。

(2) 缺点

① 在输电端及受电端必须设置交、直流变换装置。必须设置能给负荷提供无功功率的电力电容器及同步调相机。如果不是长距离输电，建设成本就高。

② 使用交、直流变换装置会产生高次谐波，必须设法避免。

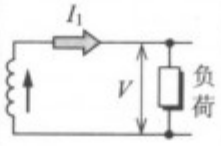
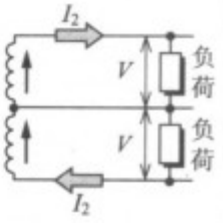
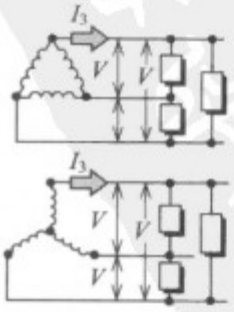
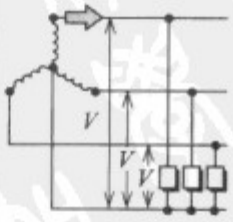
③ 以大地为回路时，要考虑电腐蚀的危害。

④ 与交流电相比较，切断高电压、大电流的直流电相当困难。

交流输电

交流输电方式使用变压器，容易变换电压。日本的电力系统广泛采用交流输电。交流输电方式的种类示于表 8.13，有单相 2 线制、单相 3 线制、三相 3 线制、三相 4 线制。

表 8.13 交流输电方式的种类

电气方式	单相 2 线制	单相 3 线制	三相 3 线制	三相 4 线制
接线				
电线总质量/kg	100	37.5	75	33.3
每一条电线的输送功率/W	100	66.6	115	87

单相2线制及单相3线制用于供给单相负荷的低压配电线路。三相3线制及三相4线制用于低压或高压配电线路。为了有效地输送电力，输电线一般采用三相3线制，而单相4线制则用于大宗用户的配电。

9　输电线路的线路参数

要　点

线路参数是指在输电线路中电线具有的电阻、电感、电容及漏导四个参数。线路参数主要由导体的种类、粗细及配置决定。

解　释

电　阻

图 8.51 表示一条电线的长度是 l(m)，电线的断面积是 A(mm²)，电阻率是 ρ(Ω·mm²/m)，则此电线的电阻 R 可以用以下式子表示：

$$R=\rho\frac{l}{A}\ (\Omega)$$

当电线中有随时间变化的交流电流流过时，电流密度在导体的中心部分低，在周边部分高。越接近周边部分电流越大，此现象叫趋肤效应。因此可以说对于交流而言的电阻值比直流的场合增加了。另外，趋肤效应也随着频率的不断增高，断面积越大就越明显。图 8.52 表示趋肤效应的影响。

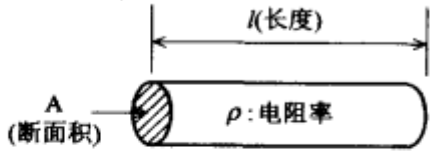


图 8.51　电线的电阻

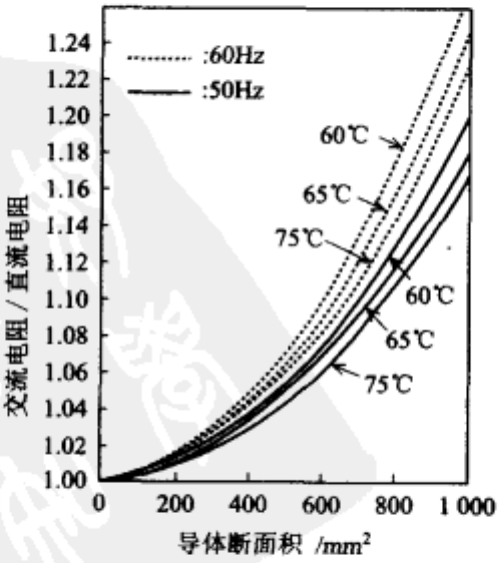


图 8.52　趋肤效应的影响

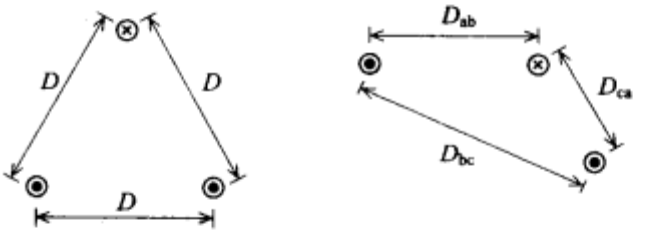
电　感

作用电感

输电线路的电感包括自感和互感。把自感与互感作为一个整体来看，称为作用电感。用一条电线，每 1km 的数值表示。

图 8.53(a)表示配置 3 条半径为 r(m)的电线，线间距离为 D(m)时，设电线的相对磁导率为 μ_s，每条电线，每 1km 的作用电感 L(mH/km)由以下式子求得：

$$L=0.05\mu_s+0.4605\lg\frac{D}{r}\ (\text{mH/km})$$



(a) 三相 3 线制　　(b) 线间距离不相等的输电线路

图 8.53　输电线路的电线配置

图 8.53(b)表示输电线路用不同的电线配置时，假设各线间距离分别为 D_{ab}、D_{bc}、D_{ca}，D(m)可用以下式子求得：

$$D=\sqrt[3]{D_{ab}D_{bc}D_{ca}}\ (\text{m})$$

式中，D 称为等效线间距离(或几何学平均距离)。另外，用铜线或铝线的相对磁导率为 $\mu_s=1$。

电　容

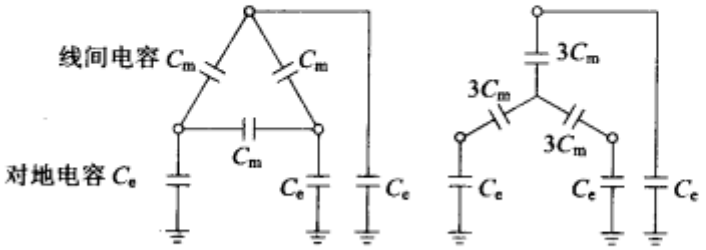
线间电容

对地电容

作用电容

图 8.54 表示按正三角形顶点配置输电线路的电线相互间及电线与大地之间的电容分布情况。2 线之间的电容 C_m 称为**线间电容**；一条电线与大地之间的电容 C_e 称为**对地电容**。图 8.54(a)的电路可以用图 8.54(b)的等效电路表示，所以输电线路的一条线与中点之间的电容 $C=C_m+C_e$。每 1km 的电容 C(μF/km)称为**作用电容**。如果设线间距离为 D(m)，电线的半径是 r(m)，则一条电线每 1km 的电容 C(μF/km)可用以下式子求得：

$$C=C_e+3C_m=\frac{0.02413}{\lg\dfrac{D}{r}}\ (\mu F/km)$$



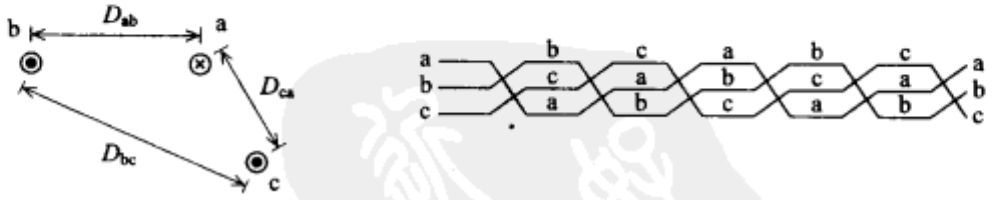
(a) 正三角形配置的电容　(b) 等效电路

图 8.54　输电线路的电容

输电线路的交叉

实际的输电线路并不是按三角形的顶点配置，而是如图 8.55(a)所示。因此电线相互之间的距离，电线对地与电线的高度都不对称，各线的电感与电容也不同。因此即使在输电端加对称三相电压，在受电端也成了不对称电压。所以要像图 8.55 所示，在全线路长度 3 等分(一回线)或 6 等分(平行 2 回线)处将线路的配置交换一次。可以使各相的电感和电容得到平衡，称为**交叉**。

交叉



(a) 电线的配置　(b) 6 等分的交叉

图 8.55　输电线的交叉

短距离输电线路

输电线路如果是十几千米以下，就叫短距离输电线路。此时可以将阻抗看作是只有集中的电阻和电感的电路。图 8.56(a)是三相 3 线制的一条线的等效电路；图 8.56(b)表示以受电端电压 $\dot{E}_r$(V)为基准画的相量图。在图 8.56(b)中，假设 $\dot{E}_s$ 与 $\dot{E}_r$ 的相位差为 θ，则 $\theta=\theta_s-\theta_r$。由于式中的 θ 很小，可近似为 $E_s\approx\overline{Oc}$。因此根据相量图，送电端的电压

E_s 可以用下式表示：

$$E_s \approx \overline{Oa}+\overline{ab}+\overline{bc}=E_r+RI\cos\theta_r+XI\sin\theta_r$$
$$=E_r+I(R\cos\theta_r+X\sin\theta_r)\ (\mathrm{V})$$

式中，因三相 3 线制送电端的线电压 V_s(V)与受电端的线电压 V_r(V)有 $V_s=\sqrt{3}E_s$，$V_r=\sqrt{3}E_r$ 的关系，故可以用下式表示：

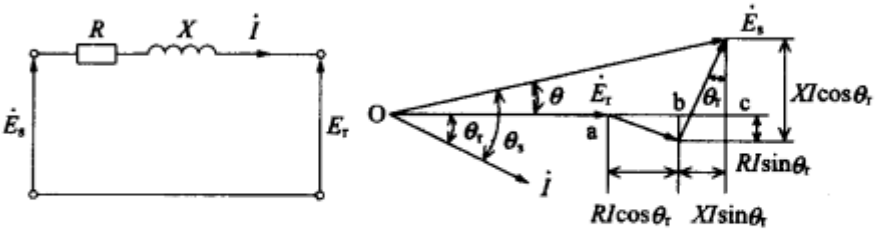
$$V_s \approx V_r+I(R\cos\theta_r+X\sin\theta_r)\ (\mathrm{V})$$

因此输电线路的电压降可用下式表示：

$$v=\sqrt{3}I(R\cos\theta_r+X\sin\theta_r)\ (\mathrm{V})$$

线路的电压降率 ϵ(%)可用下式表示：

$$\epsilon=\frac{v}{V_r}\times 100\%=\frac{V_s-V_r}{V_r}\times 100\%$$
$$=\frac{\sqrt{3}I(R\cos\theta_r+X\sin\theta_r)}{V_r}\times 100\ (\%)$$



(a) 等效电路　　(b) 相量图

图 8.56　短距离输电线路

中距离输电线路

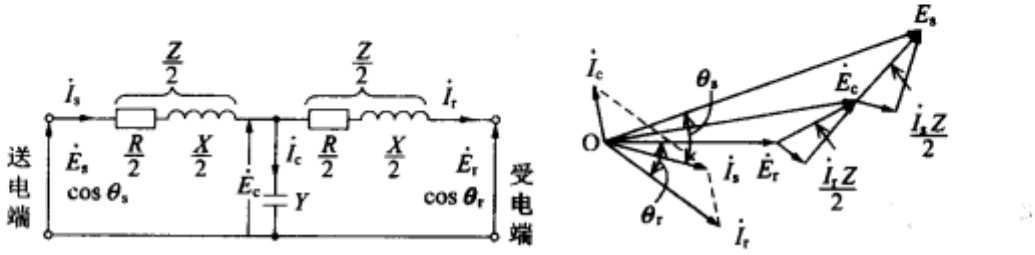
输电线路如果长度在 50km 左右，就是中距离输电线路，此时电容的影响就不能忽略。因此计算时可利用将作用电容集中在线路中央的 T 形电路，以及将作用电容集中在送电端及受电端两处的 π 形电路。

T 形电路
π 形电路

T 形电路　图 8.57(a)表示的 T 形电路是将阻抗 Z 两等分，将导纳 Y 集中在中央。由图 8.57(b)以受电端电压 $\dot{E}_r$ 为基准的相量图可知，电压、电流的关系可以用下式表示：

$$\dot{I}_s=\dot{I}_r+\dot{I}_c=\dot{I}_r\left(1+\frac{ZY}{2}\right)+\dot{E}_rY$$

$$\dot{E}_s=\dot{E}_c+\dot{I}_s\frac{Z}{2}=\dot{E}_r\left(1+\frac{ZY}{2}\right)+ZI_r\left(1+\frac{ZY}{4}\right)$$



(a) 等效电路　　(b) 相量图

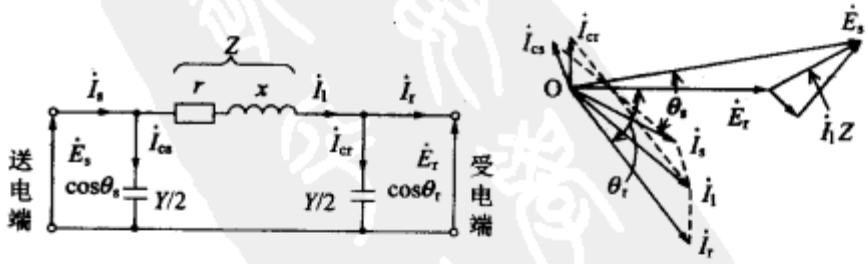
图 8.57　T 形电路

π 形电路　图 8.58(a)表示 π 形电路。就是将阻抗集中在线路的中央，将导纳两等分，放在送电端与受电端。由图 8.58(b)的相量图可知，电压、电流的关系用下式表示：

$$\dot{E}_s=\dot{E}_r+\dot{I}_1Z=\dot{E}_r+\left(\dot{I}_r+\dot{E}_r\frac{Y}{2}\right)Z$$

$$=\dot{E}_r\left(1+\frac{ZY}{2}\right)+\dot{I}_rZ$$

$$\dot{I}_s=\dot{I}_1+\dot{I}_{cs}=\dot{I}_r\left(1+\frac{ZY}{2}\right)+\dot{E}_rY\left(1+\frac{ZY}{2}\right)$$



(a) 等效电路　　(b) 相量图

图 8.58　π 形电路

10 输电线路的构成及特性

要 点

输电线路有利用空气绝缘性的架空输电线路及用绝缘材料将电力电缆埋设在地下的地下输电线路。架空输电线路及地下输电线路在经济性和安全性方面各有千秋，用在不同的场所。

解 释

架空输电线路

架空输电线路由电线、支持物、绝缘子、架空地线等构成。

电 线 用在架空输电线路的电线必须考虑以下要求才能选定：

① 电导率高。

② 耐久性好。

③ 机械强度高。

④ 密度小，价廉。

图 8.59 表示广泛使用的钢芯铝绞线（ACSR）。表 8.14是用在架空线路的电线种类。

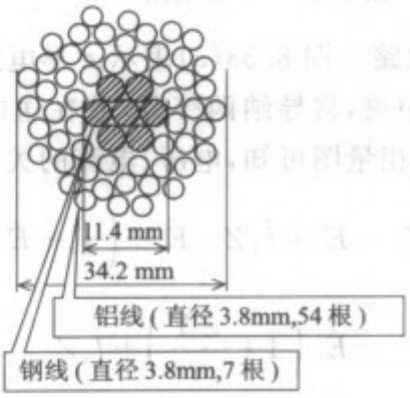


图 8.59 钢芯铝绞线

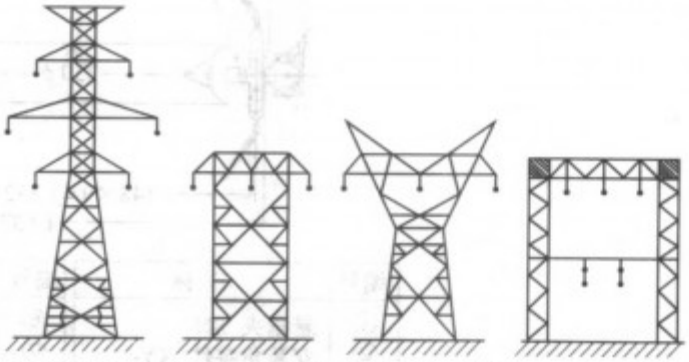
表 8.14 电线的种类

种 类	电导率	使用温度（连续）	用途与特点
钢铜绞线（HDCC）	98%以上	90℃	用机械强度大的钢铜铰线绞合，用在154kV以下的输电线，因经济方面原因最近很少使用
钢芯铝绞线（ACSR）	61%以上	90℃	中心部用镀锌钢线以补偿抗拉强度。外层用钢铝铰线绞合。广泛用于输电线路
钢芯1号铝合金绞线（IACSR）	52%以上	90℃	用铝合金线代替 ACSR 钢铝线，使抗拉强度增加，用于长跨度的输电线或架空地线

续表 8.14

种 类	导电率	使用温度(连续)	用途与特点
钢芯耐热铝合金绞线(TACSR)	58%以上	150～180℃	用耐热铝线代替 ACSR 钢铝线，大幅度增加电流容量，用于大容量输电线路
铝覆钢绞线(AC)	随种类不同	150℃	在钢线的周围被覆铝，用在大容量输电线的架空地线

支持物 在架空线路的支持物中有铁塔、铁杆、钢筋混凝土杆。在日本，154kV 以上的架空输电线路都是使用铁塔。铁塔的种类示于图 8.60，有四方铁塔、长方形铁塔、酒杯形铁塔和门形铁塔等。



(a) 四方铁塔 (b) 长方形铁塔 (c) 酒杯形铁塔 (d) 门形铁塔

图 8.60 铁塔的种类

绝缘子 为了使电线与支持物充分绝缘，使用瓷制绝缘子。常用在输电线路中的绝缘子有悬垂绝缘子、针形装脚绝缘子及线路柱形绝缘子等。图 8.61 表示绝缘子的种类及结构。保证电线绝缘的绝缘子必须在电气及机械方面保持足够的性能。所以应具备以下条件：

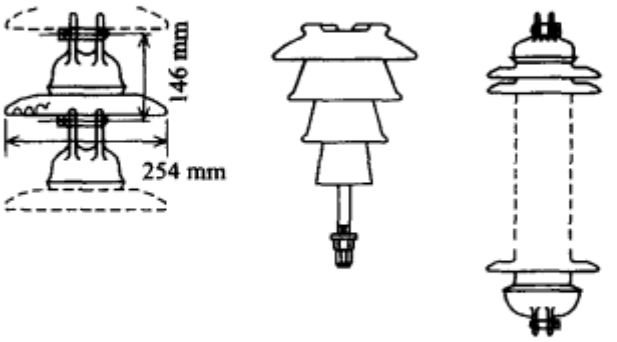
① 能经受常规电压及对地短路事故时的内部异常电压。

② 经过长年累月，电气及力学性能的变化要少。

③ 要有足够的机械强度。

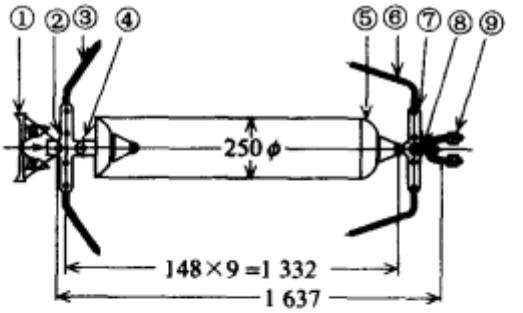
④ 不吸收湿气，能耐受温度的急剧变化。

图 8.62 表示在将绝缘子安装在支持物上以保持电线输电时使用的组件。这些叫做绝缘子装置。



(a) 悬垂绝缘子　(b) 针形装脚绝缘子　(c) 线路柱形绝缘子

图 8.61　绝缘子的种类及结构



编号	名　称	编号	名　称
①	悬垂夹 SN-	⑥	防闪络角
②	安装角零件 XY-	⑦	安装角零件 X-
③	防闪络角	⑧	U 形夹持器 UC-
④	平行夹持器 CP-	⑨	U 形螺钉 U-T
⑤	悬垂绝缘子		

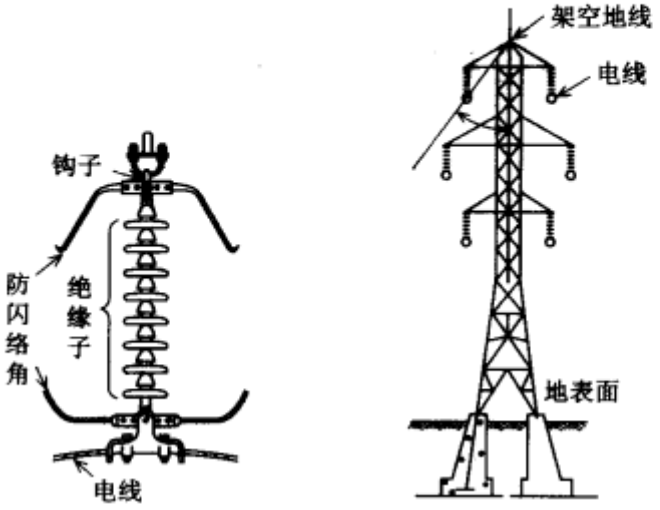
图 8.62　绝缘子装置的组成

图 8.63 表示为了保护绝缘子不受雷击或异常电压而设置的防闪络角及架空地线。

电线的悬垂

将电线架设在两个支持物上时，中间会向下悬垂。如果减小悬垂，则可以降低支持物的高度，但是电线要承受很大的拉力，有断线的危险。加大悬垂可以降低电线的拉力负荷，但支持物要增加高度，电线就会摇摆，如果树木和电线接触就有发生短路或对地短路的危险。因此，在设计架空输电线时考虑电线的悬垂是非常重要的。

图 8.64 表示 A 和 B 两个支持点的高度相同时，设 $\hat{AB}$



(a) 防闪络角　　(b) 架空地线

图 8.63　防闪络角及架空地线

间的跨度为 S(m)，电线在水平方向的拉力是 T(N)，电线长度每 L(m)的质量是 W(N/m)，悬垂 D 可表示如下：

$$D=\frac{WS^2}{8T}\ (\mathrm{m})$$

电线的实际长度如下：

$$L=S+\frac{8D^2}{3S}\ (\mathrm{m})$$

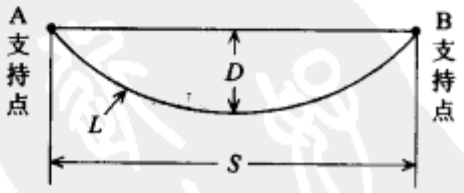


图 8.64　电线的悬垂

地下输电线路

地下输电线路就是在地面以下铺设电力电缆。电力电缆的铺设方式有直接埋设式、管路式、暗渠式，这些将在第 8 章的第 12 节解释。地下输电线路的建设费比架空输电线路贵得多，但是与架空输电线路比较，在输送电力上具有抗自然灾害的可靠性高及美观等优点，适合城市街道的输电。近几年从用地及环境等方面考虑，除了城市街道以外，在郊外也有所采用。

11 配电线路的电压及配电方式

要 点

电力依靠输电线路从发电厂送出，输送的电力以配电、变电所为界，通过配电系统将电力分配到各个用户。配电线路以配电变压器为界，分成高压配电线路及低压配电线路。

随着社会的日益进步及高度的信息化，对电子机器必须供应高质量的电力。因此要针对配电地区的不同条件，安排所需要的设备供给稳定的电力。

解 释

配电电压的区分

根据《电气设备技术标准》第2条，电压分为低压、高压、超高压3种。图8.65表示配电电压的分类方法。

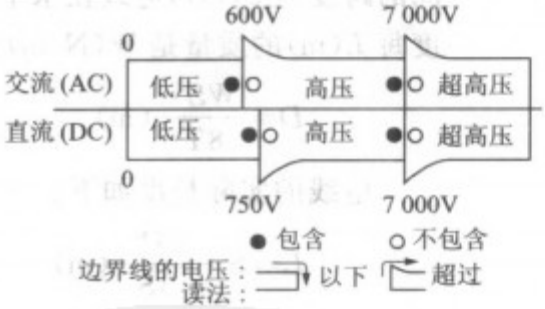


图8.65 配电电压的区分

配电线路的标称电压

配电线路的电压用标称电压(线间电压)表示。表8.15是日本使用的标称电压。

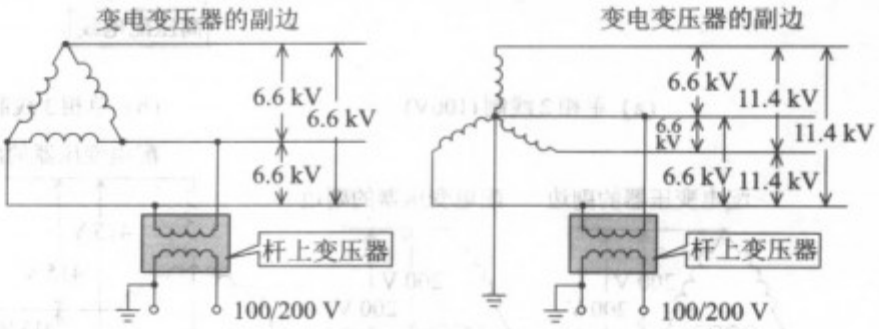
表8.15 配电线路的标称电压

电压的种类	标称电压/V
低压	100,200,100/200,415,240/415
高压	3300,6600
超高压	11000,22000,33000

摘自JEC158标准电压(1970)，(JEC是日本电气学会电气规格调查会标准规格)

配电线路的接线方式

高压配电线路的接线方式 图 8.66 表示高压配电线路的接线方式。在高压配电线路中用得最多的是非接地三相 3 线制，但是从电力供应的增强及有效利用现有设备的观点看，也使用中点接地的三相 4 线制。



(a) 三相 3 线制(非接地方式)　　(b) 三相 4 线制(接地方式)

图 8.66 高压配电线路的接线方式

低压配电线路的接线方式 图 8.67 表示低压配电线路的接线方式。在低压配电线路中，对电灯及小型电气设备采用单相 2 线制及单相 3 线制。动力用电使用三相 3 线制。在三相 4 线制中，利用 3 条电压线与接地的中点，可以供给 240V(照明用负荷)及 415V(动力用负荷)。这种接法称为 400V 级配电。

配电线路的构成

配电线路由馈线、干线和支线构成。

高压配电线路的构成 高压配电线路按照构成方式区分有树枝形方式(放射方式)、环形方式、高速网络方式。图 8.68 表示各种构成方式。

树枝形方式(放射方式) 树枝形方式是将干线及支线延长成放射状，结构简单，建设费用低廉，但缺点是一旦干线发生故障就是大范围停电。

环形方式 将干线连接成环形，因此可以从两个方向供电。比树枝形方式的停电范围小，可靠性高。此外，电压变动率及电力损耗也小。但施工建设费用高，用于大城市等负荷密度高的地区。

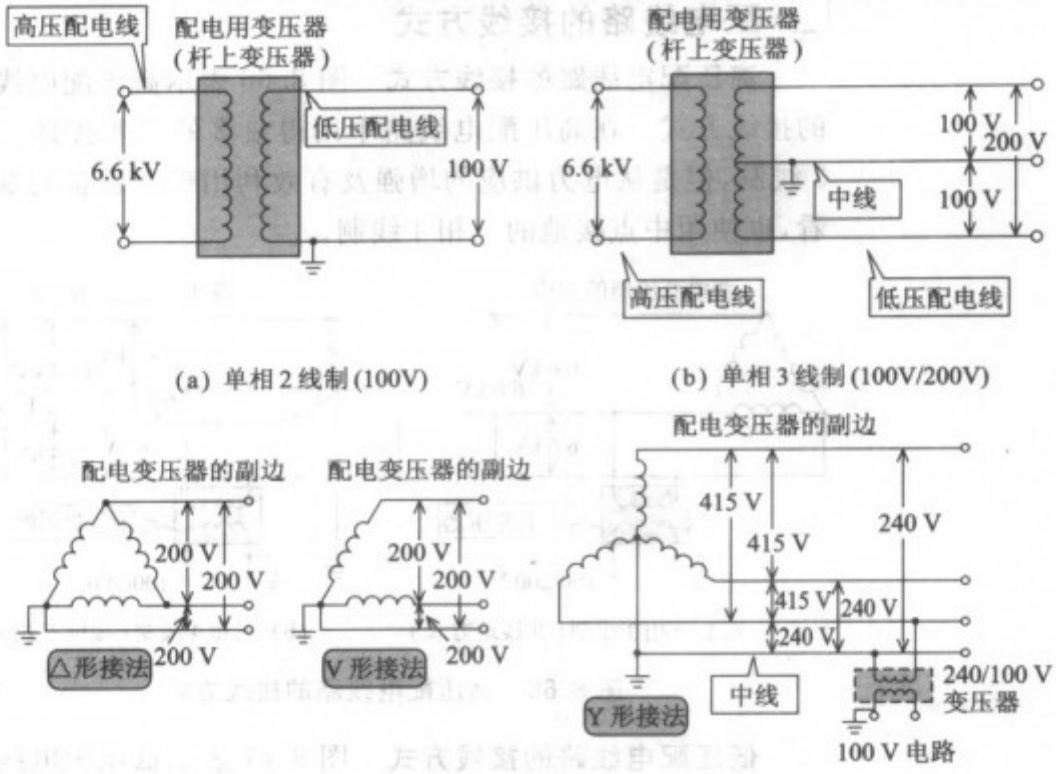


图 8.67　低压配电线路的接线方式

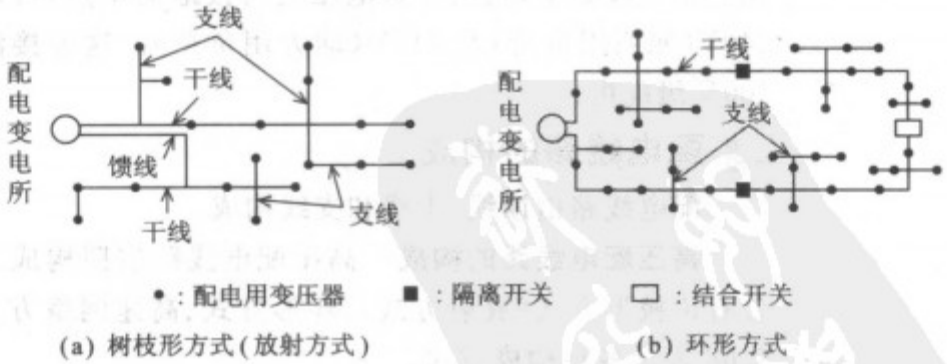
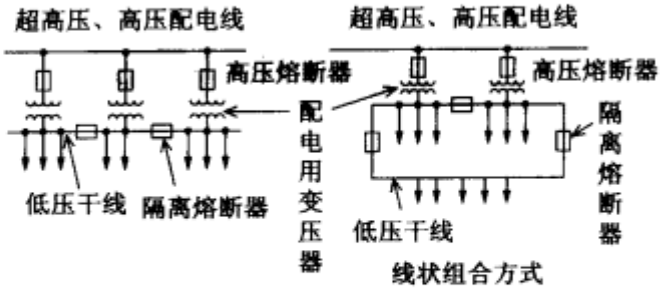


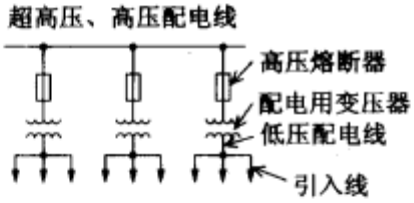
图 8.68　高压配电线路的构成方式

高速网络方式　高速网络方式是将干线连接成网状，停电范围比其他方式小，是理想的配电线路，但问题是保护方式复杂。

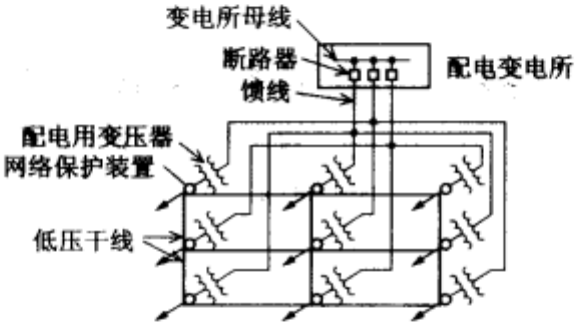
低压配电线路的构成　低压配电线路的构成有树枝形方式(放射方式)、组合方式、低压网络方式。图 8.69 表示各种方式的构成。



(a) 组合方式



(b) 树枝形方式(放射方式)



(c) 低压网络方式

图 8.69　低压配电线路的构成方式

组合方式　组合方式是将接在高压配电线上的 2 台以上的配电变压器的副边低压配电线路相互连接，使配电变压器的供应电力能互相通融，可以减轻低压配电线路的电压降，电力损耗及变压器的容量等。但如果在低压侧发生短路事故时，短路电流会流过变压器，使相互连接的变压器一个接一个地从系统切断，造成大面积停电。这种现象称为**级联**。

级联

树枝形方式(放射方式)　树枝形方式(放射方式)与高压配电线路的使用场合相同。结构简单，维护容易，使用广泛。

低压网络方式　低压网络方式是在从配电变电所同一母线引出的二次线以上的配电线连接变压器，并将变压器的副边干线连接成网状。采用这种方式，当一条供电线或变压器发生故障时，因相邻的变压器接在不同的供电线路上，网络保护装置能立即切断故障线路。其他设备可使用剩余的健全供电线而不受波及，实现无停电供电。

12　配电线路的构成

要　点

配电线路有架空配电线路和地下配电线路。架空配电线路由支持物、电线、配电用变压器、隔离开关等构成。地下配电线路由电力电缆、多回路开关、变压器等构成。地下配电线路的铺设方式有直接埋设式、管路式、暗渠式。

解　释

架空配电线路的构成

架空配电线路是由支持物、电线、绝缘子、配电用变压器、隔离开关等组成。图 8.70 是配电电杆的结构示例。

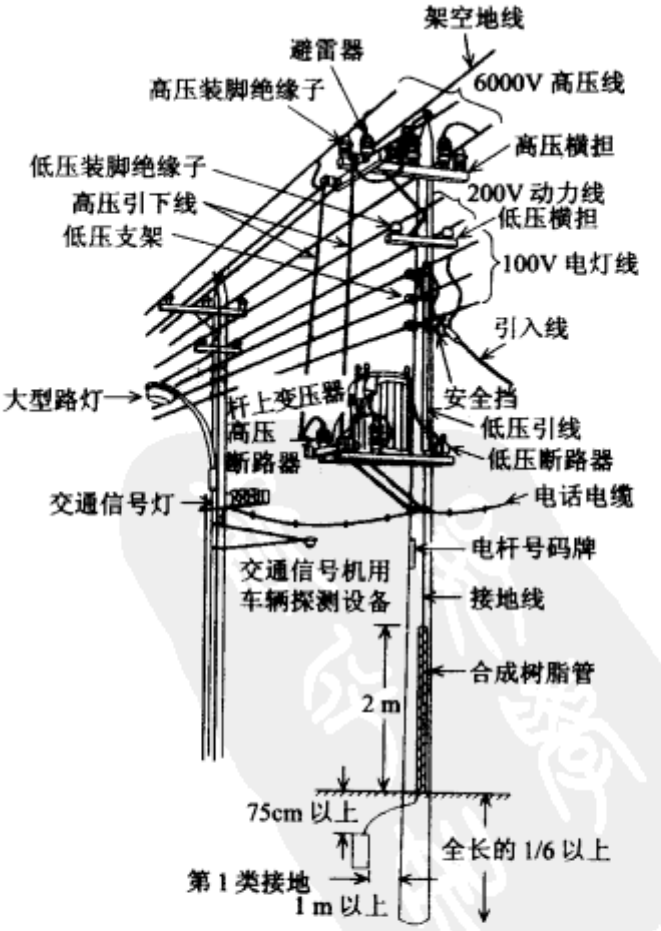


图 8.70　电杆的结构示例

支持物　架空配电线的支持物有钢筋混凝土杆、木杆、

铁杆等。现在从经济性及强度方面考虑，主要使用钢筋混凝土杆。

电线 根据《电气设备技术标准》，规定架空配电线路要使用绝缘电线，即使用被覆了绝缘物的铜线或铝线。不允许使用裸线。主要使用的绝缘电线是：高压配电线路多选用室外用聚乙烯绝缘电线（OE 线）或室外用交连键聚乙烯绝缘电线（OC 线）；低压配电线路使用室外用乙烯基绝缘电线（OW 线），及引入用乙烯基绝缘电线（DV 线）等。

绝缘子 为了使支持物与电线绝缘，在配电线路中要使用绝缘子。有高压绝缘子与低压绝缘子。它们的区别是：高压绝缘子的表面有红色带，高压绝缘子分为装脚绝缘子、实心绝缘子、抗拉绝缘子；低压绝缘子有装脚绝缘子、多沟绝缘子、绑线绝缘子。图 8.71 是高压绝缘子示例，图 8.72 是低压绝缘子示例。

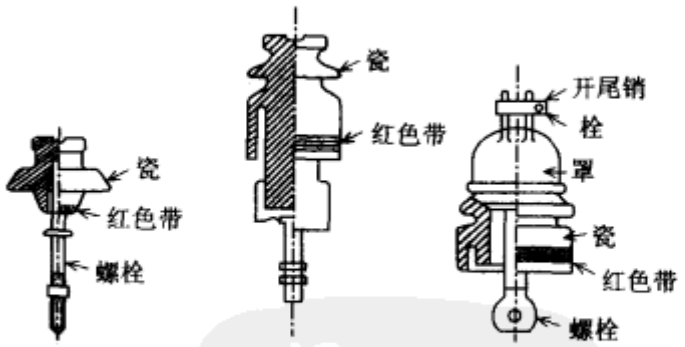


图 8.71 高压绝缘子示例



图 8.72 低压绝缘子示例

配电用变压器 配电用变压器将高压降为低压，以供给电力用户。现在多使用 50kV 以下的配电用变压器。

另外，对于三相负载也有用三相变压器的，但多采用2台单相变压器的V形接法，以提供200V的三相电源。

隔离开关　设置隔离开关是为了在高压配电线路发生火灾或其他事故，以及维修作业时能切断部分电路。开关的种类有空气开关、真空开关、充气开关等，还有手动式及用控制器的自动式。

避雷器　安装避雷器可以限制因雷电侵入配电线路的浪涌电压，以保护配电线路和机器。

电力电容器　电力电容器可以改善功率因数，减少电力损耗，对电压变动能有所改善。

地下配电线路的特点

地下配电线路与架空配电线路比较，优点是能确保电力供应，防止灾害，改善城市景观等。但问题是建设费用比架空配电线路高，工期也相当长。此外，在发生事故后的修复工作也很耗费时间。

地下配电线路的构成

电力电缆　在高压及低压配电线路中的电力电缆是使用交链键聚乙烯绝缘，乙烯基外皮电缆(CV电缆)。在三相3线制中多使用3股单芯CV电缆绞合而成(CVT电缆)。

多路开关　多路开关是在地下配电线路中为电缆分支使用。对于需要高压的用户供应分支电力时使用内带开关的，称为供电用配电箱。

变压器　对于需要低压的用户，地下配电线路使用的变压器有设置在路上的地上用变压器，以及设置在地下的直埋变压器。还有把低压电力电缆分支的低压分支装置。

地下配电线路的铺设方法

地下配电线路的铺设方法有直接埋设式、管路式和暗渠式。

直接埋设式　图8.73是在铺设电力电缆的场所挖沟，并使用混凝土作为电缆架的电缆埋设方法。埋设地点上面如果有重物(车道部分)，电缆会受到压力，回填土的厚度要在1.2m以上。其他场所(人行道部分)应在0.6m以上。

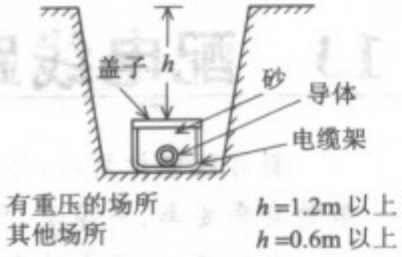


图 8.73 直接埋设式

管路式 图 8.74 示例管路式地下配电线路。在地下 1.2m 以上的深度设置有许多排线槽配线管的混凝土管路，并在适当间隔设置人孔，便于电力电缆的拉进、拉出、连接及检查作业。

这种方法对电缆的增减或更换、连接及故障修复都比较简单、易行，但缺点是施工费用高、施工时间长。

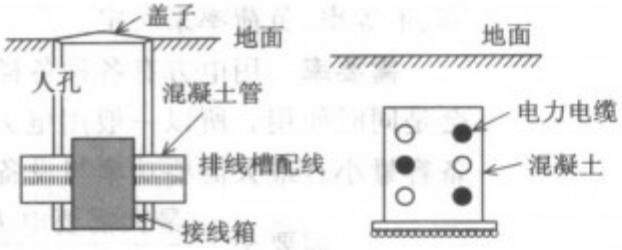


图 8.74 管路式

暗渠式 暗渠式示于图 8.75。在混凝土制的暗渠(隧洞)中，将电力电缆固定在支架上。比管路式多增设了排气设备，故用在因很多电力电缆发热使输电效率明显下降的场合。



图 8.75 暗渠式

另外，共沟式是暗渠式的一种，可防止在道路的同一场所重复开挖，有利于节约建设费用。用在大城市或交通量多的地方。

13　配电线路的特性

要　点

制订配电计划时，作为表示用电设备与供电设备关系的系数有需要率、不等率、负荷率。

电压降、电压变动率、功率损耗等，是配电线路重要的电气特性。为了保证供给稳定的电压，必须减少电压降及功率损耗。

解　释

供电设备与用电设备

供电设备
用电设备

供应电力的电力公司叫供电方，使用电力的叫用电方。提供电力的变压器或电线等叫**供电设备**，使用电的电灯、机器、室内配线等叫**用电设备**。在做配电设计时要考虑需要率、不等率、负荷率来决定。

需要率　用电方有各种各样的用电设备，但这些设备不会是同时使用。所以一般用电方实际使用的最大功率比设备容量小。最大需要功率与设备容量之比称为需要率：

$$需要率=\frac{最大需要电力(kW)}{设备容量(kW)}\times 100\ (\%)$$

不等率　一般来说，所有用电设备的最大需要功率不会在同一时刻发生。如果忽略时刻，各个用电户最大需要功率的总和要比综合整体时合成的最大需要功率大。表示二者之比的系数叫做不等率。

$$不等率=\frac{各个用电设备的最大需要电力的总和(kW)}{合成需要电力(kW)}\times 100\ (\%)$$

负荷率　电力的需要随时间和季节变化。在某期间平均需要功率与该期间中的最大需要功率之比称为负荷率：

$$负荷率=\frac{平均需要电力(kW)}{最大需要电力(kW)}\times 100\ (\%)$$

负荷率按照期间的划分有日负荷率、月负荷率和年负荷率，可以由负荷曲线求出。图 8.76 是表示在一天内需要电力变化的日负荷曲线。表 8.16 及表 8.17 表示了需要率、负

荷率、不等率。

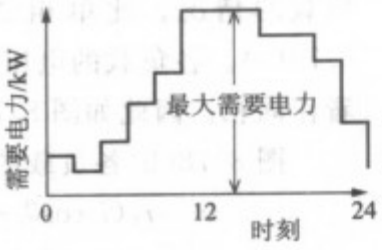


图 8.76 日负荷曲线

表 8.16 需要率与负荷率

地 区	需要率/%	日负荷率/%
商业地区	88	30
工业地区	80	25
住宅地区	50	45

表 8.17 不等率

需要的设备	不等率/%	需要的设备	不等率/%
电灯照明需要	1.14	动力变压器群	1.36
动力需要	1.58	配电用的干线	1.09
电灯变压器群	1.18	配电用变电所	1.02

配电线路的电压降

集中负载 图 8.77 是单相 2 线制配电线路。末端接有功率因数为 $\cos\theta$ 的负载。假设往返线路的电阻为 $r(\Omega)$，电抗为 $x(\Omega)$，配电线路中的电流为 $I(\mathrm{A})$，受电端电压为 $V_r(\mathrm{V})$时，供电点的端电压 $V_s(\mathrm{V})$可表示如下

$$V_s = V_r + (r\cos\theta + x\sin\theta)I$$

因此，单相 2 线制配电线路的电压降为

$$v = V_s - V_r = (r\cos\theta + x\sin\theta)I$$

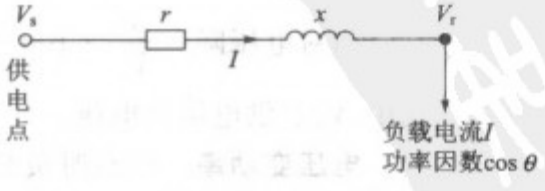


图 8.77 单相 2 线式配电线路(单一负载)

分布负载　图 8.78 是在单相 2 线制配电线路里有两个负载的情况。此单相 2 线制配电线路的相量图示于图 8.78(a)。各负载的电压 V_a、V_b、V_c 的相位差很小，可以忽略看作同相。因此如图 8.78(b)所示，V_a、V_b、V_c 在一直线上。

图 8.78(b)各负载的线路电压降 u_1 及 u_2 用下式表示：

$$v_1 = r_1(i_1\cos\theta_1 + i_2\cos\theta_2) + x_1(i_1\sin\theta_1 + i_2\sin\theta_2)$$

$$v_2 = r_2 i_2\cos\theta_2 + x_2 i_2\sin\theta_2$$

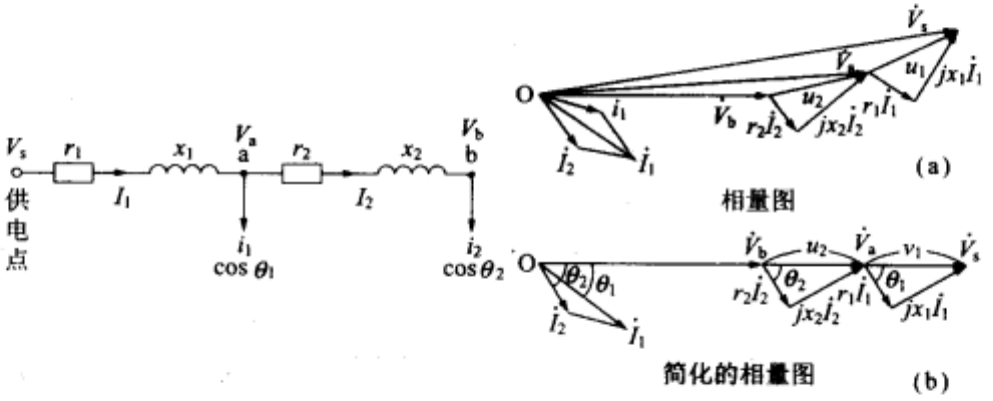


图 8.78　单相 2 线制配电线路(分布负载)

全电路的电压降用下式表示：

$$v = v_1 + v_2$$

由上述可知，分布负载的全电压降 v(V)是各负载电压降之和，即

$$v = v_1 + v_2 + \cdots + v_n$$

三相电路的使用场合也可以和单相电路同样考虑，所以在三相 3 线制中，用 1 条线的电阻及电抗值计算出的线路电压值是该值的$\sqrt{3}$倍。

相对电压降　电压降 v(V)与受电端电压 V_r(V)之比叫做相对电压降，用下式表示：

$$\text{相对电压降} = \frac{v}{V_r}\times 100 = \frac{V_s - V_r}{V_r}\times 100(\%)$$

式中，V_s 是供电端的电压。

电压变动率　空载时负载端电压 V_{or}(V)与满载时负载端电压 V_r(V)之差值，与电压 V_r(V)之比称为电压变动率。电压变动率(%)用下式表示：

$$\text{电压变动率}=\frac{V_{or}-V_r}{V_r}\times 100\ (\%)$$

功率损耗 配电线路的功率损耗，以线路的电阻损耗及杆上变压器等的铜损、铁损为主。其中最大的功率损耗是线路的电阻损耗。

现假设线间电压为 V(V)，功率因数为 $\cos\theta$，负载功率 P(W)，一条线的电阻是 $r(\Omega)$，则负载电流 I(A)及电阻损耗 p_l 可用下式表示。

单相 2 线制：从 $P=VI\cos\theta$ 得出 $I=\dfrac{P}{V\cos\theta}$

$$P_l=2I^2r=2\left(\frac{P}{V\cos\theta}\right)^2 r=\frac{2P^2r}{V^2\cos^2\theta}\ (\text{W})$$

三相 3 线制：

从 $P=\sqrt{3}VI\cos\theta$ 得出 $I=\dfrac{P}{\sqrt{3}V\cos\theta}$

$$P_l=3I^2r=3\left(\frac{P}{\sqrt{3}U\cos\theta}\right)^2 r=\frac{P^2r}{V^2\cos^2\theta}\ (\text{W})$$

电阻损耗与电阻值成正比，与负载电流的 2 次方成正比。因此要减轻功率损耗可以降低电线的电流密度。减少功率损耗的方法还可以列举以下几点：

① 提高配电电压，因为功率损耗的大小与电压的平方成反比。

② 换用粗电线，增设配电线路，可以减少功率损耗。

③ 给负载并联移相电容，因负载电流与功率因数成反比，所以功率损耗的大小与功率因数的平方成反比。

④ 改变杆上变压器的配置及容量，增设供电点及位置变更，可以减少功率损耗。

14　配电线路的电压调整

要　点

为了使送往用户的供电电压维持在额定值，防止变动，要对配电电压进行调整。有在配电用变电所进行的方法及在配电线路上进行的方法。

为了有效利用配电设备，减轻配电线路的电力损耗，必须设法改善配电线路的功率因数。

解　释

供电电压的变动

与输电线路一样，配电线路在负荷变动时送到用户的电压也会变动。负荷增加，电压就降得多；负荷减轻，电压就上升。要防止这种电压的变动有必要对配电线路进行电压调整。

电压的容许变动范围有规定，以电线进入用户时的电压为基准，电灯线的电压是(101±6)(V)以内；动力线是(202±20)(V)以内。

在配电用变电所的电压调整

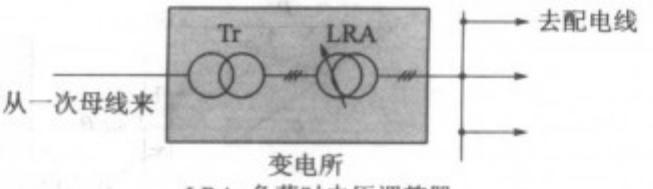
在高压配电线路的配电用变电所进行电压调整，使用负荷时电压调整器(LRA)或负荷时切换分压抽头变压器(LRT)等方法。图8.79表示在配电用变电所的电压调整。

在配电线上的电压调整

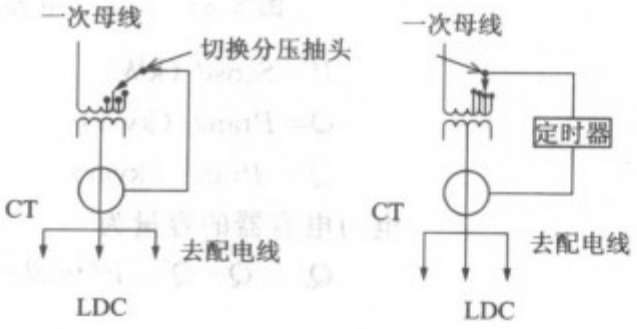
在配电线上进行电压调整的方法示于图8.80。在高压配电线路的途中设置升压变压器使电压上升。升压器就是把单相变压器接成三相的自动电压调整器。图8.81表示用杆上变压器的分压抽头调整电压的方法。因为在配电线路上干线的电压随着距离的增加逐渐降低，所以用切换分压抽头调整电压，可使副边电压保持额定值。

功率因数的改善

一般配电线路的负荷是滞后的功率因数。改善功率因数可以有效利用配电设备及减轻配电线路的电力损失。在负荷上并联电力电容器就可以把功率因数提高到接近

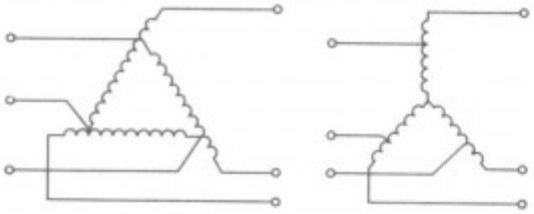


LRA: 负荷时电压调整器



(a) LDC 方式　　(b) LDC 方式+程序式

图 8.79　在配电用变电所进行电压调整



(a) △形接法　　(b) Y形接法

图 8.80　单相升压变压器

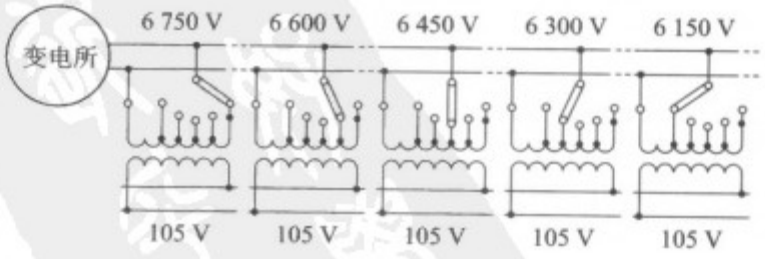


图 8.81　杆上变压器的分压抽头用法

100%。图 8.82 表示用电力电容器改善功率因数。

假设负荷的视在功率为 S(kV·A)，无功功率为 Q(kvar)，功率因数改善成 $\cos\theta'$ 时的无功功率为 Q'，改善功率因数所使用电力电容器承担的功率分量为 Q_c(kvar)，则

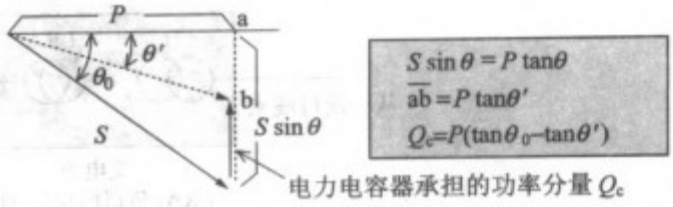


图 8.82　用电力电容器改善功率因数

$$P = S\cos\theta \ (\text{kW})$$

$$Q = P\tan\theta_0 \ (\text{kvar})$$

$$Q' = P\tan\theta' \ (\text{kvar})$$

电力电容器的容量为

$$Q_c = Q - Q' = P(\tan\theta_0 - \tan\theta') \ (\text{kvar})$$

15　电力系统的维护

要　点

从发电厂发出的电力通过电力系统送到用户。为了安全稳定地供电，在维护电力系统的工作中，采用电力开关、中点接地，以及对感应引起的故障、异常电压等进行保护的各种措施。

解　释

电力通断装置

开关　开关用在对电路的维护及通断操作，分为空气开关、真空开关和充气开关等。

隔离开关　隔离开关用在对电气设备进行检查、修理、变更连接时使用。隔离开关没有消弧装置，不能切断负荷电流或故障电流。隔离开关是在用断路器切断负荷电流或故障电流之后，在没有电流的情况下进行开关操作。

断路器　断路器是在通常的配电线路中对电路进行通、断操作或发生故障时自动切断电路的装置。断路器的种类有磁断路器、空气断路器、真空断路器和充气断路器等。

中点接地

中点接地的目的有以下几点：

① 防止对地短路或其他原因引起的异常电压。

② 在某相发生对地短路事故时抑制其他相对大地的电压上升。

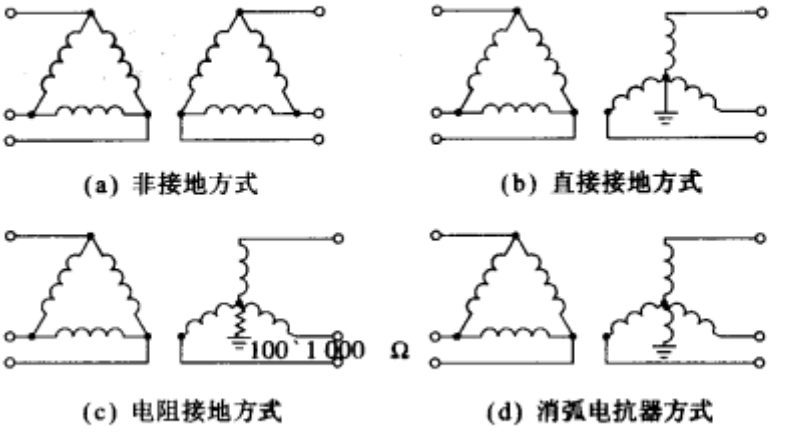
③ 发生对地短路事故时使保护继电器可靠动作。

④ 在消弧电抗器接地方式中，能很快消除一线对地的短路电弧。

中点接地方式的种类　图 8.83 表示中点接地的方式种类。

非接地方式　是中点不接地的方式。因为在对地充电电流很大的场合会发生异常电压，用于线路短的系统。

直接接地方式　用导线将中点与大地直接接地的方式。由于对地的短路电流大，对通信线路容易发生感应干扰故障。



(a) 非接地方式　(b) 直接接地方式

(c) 电阻接地方式　(d) 消弧电抗器方式

图 8.83　中点接地的方式

电阻接地方式　中点通过电阻接地。一般来说，一线对地短路电流在 100～300A，所以用 100～1 000Ω 大小的电阻。

消弧电抗器方式　在一线发生对地短路时，与对地电容发生并联谐振，使对地短路电流为零。

感应干扰故障

输电线路或配电线路与通信线路接近时，因为电压或电流的影响使通信受到干扰，有可能使机器损坏或危及操作者，叫做感应干扰故障。原因是静电感应或电磁感应。

静电感应　图 8.84 表示，电力线与通信线之间相当于电容耦合电路，因此发生静电感应。防止静电感应的方法是尽量实行电线交叉，并且使各条电线与通信线的距离相同，就几乎不会发生感应干扰故障。

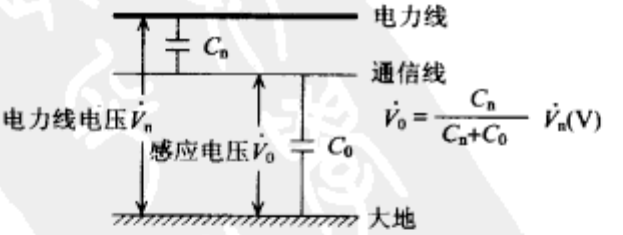


图 8.84　静电感应

电磁感应　图 8.85 表示在电力线与通信线路之间通过互感作用发生的感应电动势。要防止这种电磁感应，在发生故障时必须迅速有效地切断故障电路，以及使用屏蔽电缆作为通信线路或增大中点的接地电阻等方法来限制对地短路

电流。

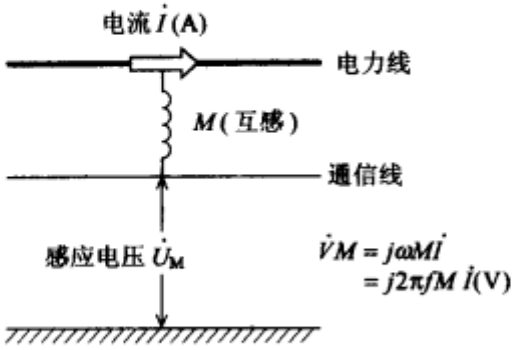


图 8.85　电磁感应

过电压的发生及防止措施

过电压

在输电、配电线路中，由于雷击或开关、断路器的通断，以及电线的对地短路事故等，发生了比通常运行电压大的过渡电压，叫做**过电压**(浪涌电压)。过电压分为雷击过电压、开关过电压和短时间过电压。

束缚电荷

雷击过电压　直击雷是由于雷雨云直接落雷到电线。感应雷是因为雷雨云接近电线时，因静电感应作用发生感应电荷，称为**束缚电荷**。大地或雷雨云之间发生放电时，就变成线路上向左右行进的行波。图 8.86 表示直击雷与感应雷。防止事故的方法是在铁塔的最上端设置架空地线以屏蔽雷电；使用避雷器，在雷击的浪涌电压侵入输电线或电力设备时，将放电电流泄放到大地。

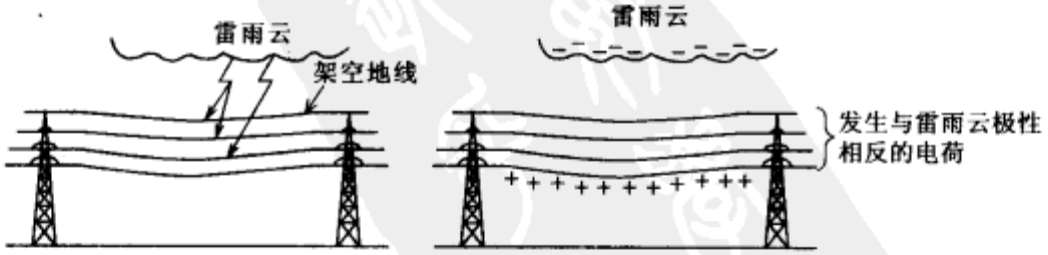


图 8.86　直击雷与感应雷

开关过电压　伴随开关或断路器的通、断发生的过电压。开关过电压的种类有接通浪涌、切断浪涌、对地短路浪涌及断路器浪涌。持续时间从几百微秒到几毫秒。也有几

微秒以下的开关电器。

短时间过电压　持续时间比较长的过电压。短时间过电压在对地短路事故或因切断负荷、产生谐振时发生。种类有商用频率过电压和高次谐波谐振的过电压。

避雷器　避雷器的作用是当落雷等原因发生了过电压，可以使电压产生的电火花飞散开，使电流流向大地，从而抑制过电压。放电除去过电压后，切断续流，抑制电流。恢复正常运行电压。

在《电气设备技术基准》的"解释"中，写明避雷器要安装在以下场所：

① 发电厂、变电所或类似的场所，安装在架空电线的引入口及引出口。

② 安置在室外的配电变压器的高压侧及超高压侧。

③ 需要从高压架空线路引电，用电容量在500kW以上场所的引入口。

④ 需要从超高压架空线路引电、用电场所的引入口。

避雷器的规格由放电间隙及特性元件决定。特性元件具有非线性的性质(电压有少许上升时电流急剧增大)。以往的避雷器用碳化硅(SiC)作为特性元件。近几年开发了非线性优异的氧化锌(ZnO)为主要成分的氧化锌避雷器，可以省去串联间隙。现在无串联间隙的氧化锌型避雷器已经成为主流。

保护继电器　在输电、配电线路中发生短路事故时，要快速而准确地检测出故障地点，必须把事故区间与线路隔断。能自动使断路器动作，并发出已从电力系统隔断信息的装置就是保护继电器。保护继电器可大致分为有触点型和无触点型。

有触点型保护继电器　图8.87表示电磁感应型保护继电器。来自电流互感器(CT)的电流超过设定值时，圆盘旋转带动可动触点与固定触点接触。脱扣线圈(TC)得到励磁，使断路器动作。

无触点型保护继电器　没有触点，有用晶体管电子电路构成的模拟型继电器及使用微处理器的数字型继电器。多

功能，可以得到很多继电器特性，可以实现高速化、小型化、节能化等。

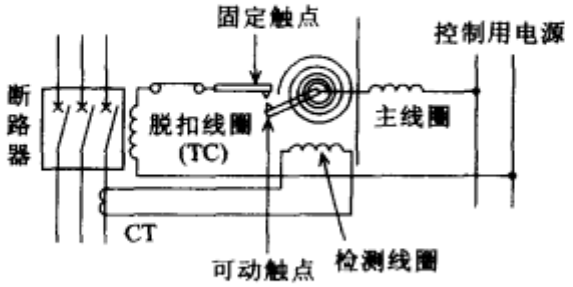


图 8.87 电磁感应型保护继电器

参考文献

1. オーム社編：新版 OHM 電験受験ポケットブック，オーム社（1994）
2. 保坂尚光著：文部省検定済教科書 標準 電力技術，オーム社（1995）
3. 桂井誠監修，オーム社編：ハンディブック電気，オーム社（1996）
4. 保坂尚光著：文部科学省検定済教科書 新しい電力技術①，オーム社（2003）
5. 小池東一郎編著，長谷川淳・大窪協・山城迪共著：改訂送配電工学，養賢堂（1995）
6. 家村道雄監修，小口芳徳・植田良馬・高澤博道・植地修也共著：絵とき電験三種完全マスター電力改訂 2 版，オーム社（2003）
7. 曽根悟・小谷誠・向殿政男監修，オーム社編：図解電気の大百科，オーム社（1995）
8. 河村達雄・河野照哉・柳父悟共著：高電圧工学 3 版改訂，電気学会（2003）
9. 電気学会編：コンパクト版電気工学ポケットブック，オーム社（1990）

第 9 章

设备与施工

● 责任编委
冈本裕生
● 执　　笔
渡边　勉 (1 ~ 3, 6, 7)
坂藤由雄 (4 ~ 5)



在技术革新与高度信息化的社会中，由于楼宇智能化的发展、电气设备的大容量化和计算机化等，电气施工也涉及电力、信息通信及防灾等多种领域。

在这一章，首先学习有关电气设备与施工的基本术语，和以电气事业法为中心的有关法规；然后介绍从高压配电线路到高压用电设备的施工方法，以及关于低压室内配线施工的基本事项。另外，还介绍高压室内电气设备的组成和电工产品的试验检查方法。

1　术语的定义及用法

要　点

关于设备及施工的有关术语，在《基于电气事业法规定的有关电气设备技术基准的省令》(以下简称“电技”)和具体表示应满足该省令技术要件的技术内容指标的《关于电气设备技术基准的解释》(以下简称“解释”)中作了定义。

解　释

有关设备安置场所的术语

用电场所　由于用电而设置电气设备的场所。

营造物　是指建筑物、广告塔等。固定在地面上的工作物中，具有屋顶、柱或墙的工作物。

建造物　人居住或从事工作的建筑物，或者人频繁出入聚会的建筑物。

雨线内　是指屋檐等通常下雨时雨水淋不到的地方(参见图9.1)。

雨线外　在房墙中雨线以外的地方(雨水能淋到的地方)。

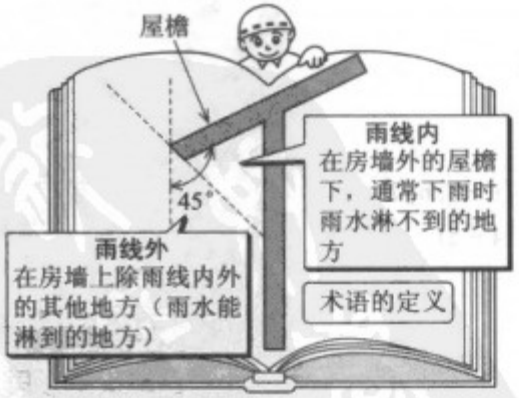


图9.1　雨线内和雨线外的定义

干燥场所　平时没有湿气或水的场所。

多湿气场所　浴室、地面或饭馆等场所。

有水场所　鱼店、蔬菜店、洗衣店、简易地下室、池塘、游泳池等及其周围。

露天场所　室内的屋顶、墙面等房外墙面，也可以是露

天场所。

能检查的隐蔽场所 有检查口的屋顶、壁橱、壁柜等。

不能检查的隐蔽场所 没有检查口的屋顶上、地板下、墙内、地下等。

人容易触摸到的地方 在室内，从地面到高 1.8m 处；在室外，从地表面到 2m 以下的地方。

人能触摸到的地方 低压时，在室内从地面算起 1.8～2.3m范围(高电压的场合是 1.8～2.5m)的地方。

与电路有关的术语

电路 在通常使用状态下，通电回路的全部或一部分。

电线路 发电厂、变电所、开关房等用电场所相互间的电线以及支持或保藏这些电线的工作物(对地下电线路，指铺设电缆的暗渠、穿线管、地下电箱等)。

电线 用来传送强电流使用的裸线、绝缘电线、多芯电线、软线、电缆等。

弱电流电路 电话线、电视天线、内部电话线或由电池供电、使用电压在 30V 以下的电路。

额定电压 对使用电的机械器具或配电用具当中规定为使用基准的电压。

对地电压 在接地式电路中，电线与大地之间的电压。

架空引入线 从架空电线路的支持物不经过其他支持物到需要场所的引入线安装点的架空电线。

引入口 从室外或房外墙面来的电路，贯通房屋外墙的部分。

干线 从引入口到支线过流断路器的配线中，从支线电路的支线点到电源一侧的部分。

支线电路 从干线支线出来，经支线过流断路器到负荷之间的配线。

配电盘 在钢板、木板、大理石板等板材上安装开关、过电流断路器及电表等的集合体。

分电盘 在分电盘上集中安装支线过电流断路器及支线开关等。

有关器材的术语

过电流断路器　如同熔断器一样，具有自动断开过负荷电流或短路电流功能的电器。

漏电断路器　发生对地短路时自动断开电路的电器。

配线断路器　检测出过电流并自动断开的过电流断路器。

配线器具　开关、过电流断路器、继电器及其他类似器具。

支持物　是木杆、铁杆、混凝土杆及铁塔等类似的工作物，主要目的是支持电线或弱电流电线。

2　有关电气法规

要　点

在有关电气法规里以电气事业法为中心，有规定为确保一般用电工作物安全的人的资格和义务的电气施工人员（电工）法；有规定为防止电气用品故障，针对制造业的电气用品安全法；有规定电气施工业的经营者正常施工业务的有关法律（以下简称电气施工业法）等。

解　释

法规的体系

与电气有关法规的根基是图 9.2 所示的电气事业法。基于此法律制定的是政令，接着还有经济产业省令（包含规则）。

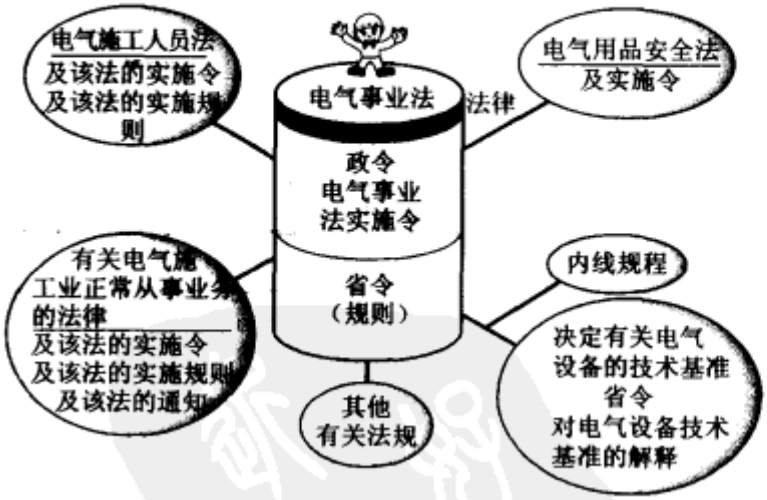


图 9.2　有关电气法规的概况

条文的读法

条文的结构　条文的一般顺序是“第 18 条→第 1 项→第 1 号→第 1 号 a”。

正文与附项　一篇文章有时分两处写，前部是正文，后部是附项。

以上、以下、超过、未满　在法令中使用的数字里，“以上”或“以下”的范围包含该数；“超过”或“未满”则不包含该数，用于指示其上、下范围时使用。

电气事业法

电气事业法的目的之一是依据电气工作物的施工维护及运用的规章，确保公共安全。为此，将电气工作物分成业务用电气工作物与一般用电气工作物。与之对应的保安体制示于图 9.3。

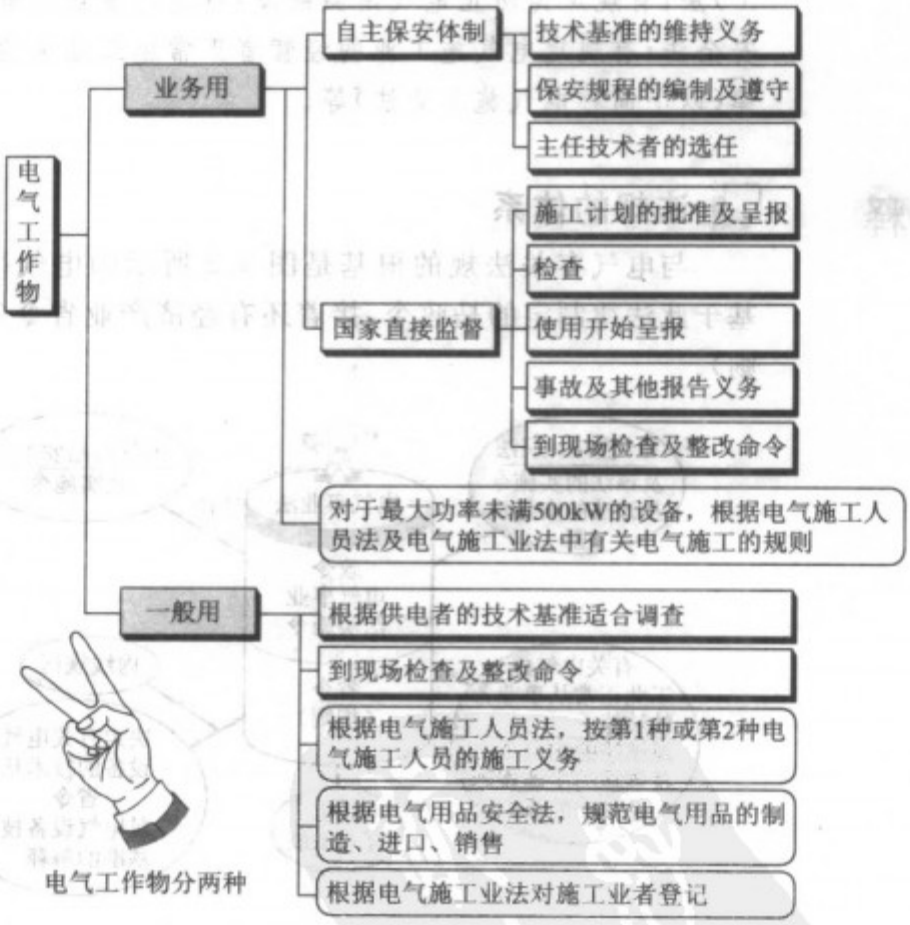


图 9.3 电气保安的体制

电气工作物的种类 电气工作物有以下两种（见图 9.4）：

①业务用电气工作物。电力公司等为了供电业务使用的工作物或旧的自用电气工作物。

②一般用电气工作物。除了①以外的电气工作物。

主任技术者的选任 为行使对工作物的施工、维护及运行有关的保安监督，业务用电气工作物的设置者由表 9.1 所

示的持有主任技术者执照的人员中选任。



图 9.4 电气工作物

表 9.1 电气主任技术者执照及其保安范围

执照的种类	保安监督的权力范围
第 1 种电气主任技术者执照	业务用电气工作物的施工、维护及运行
第 2 种电气主任技术者执照	电压未满 170kV 的业务用电气工作物的施工、维护及运行
第 3 种电气主任技术者执照	电压未满 50kV 的业务用电气工作物的施工、维护及运行（容量 5 000kW 以上的发电厂除外）

速报
速报

业务用电气工作物的事故报告 在事故报告方式中，有**速报**（电话等）与**详报**（书面文件等），对期限及报告送交地也有详细规定（见表 9.2）。

表 9.2 需要提出事故报告的事故种类与报告送交地（一部分）

事故的种类	速报	详报	报告送交地
① 触电死伤事故 ② 电气火灾事故 ③ 与电气工作物有关联的破损事故、误操作等造成社会影响的事故	从知道事故发生开始 48h 以内尽快上报	从知道事故发生日开始 30 天以内上报	所辖产业保安监督部长
④ 主要电气工作物的破损事故（配电线路或需要设备是 10kV 以上的场合）	同上	同上	同上

续表 9.2

事故的种类	速报	详报	报告送交地
⑤ 由于 3 000V 以上的自家用电气工作物的损坏，给一般电气事业者或特定电气事业者造成供电故障的场合	同上	同上	同上

电气施工人员法

电气施工人员法是为了有助于一般用电气工作物及业务用电气工作物的电气保安而制定的法律。图 9.5 表示电气施工人员的施工范围(参见表 9.3)。

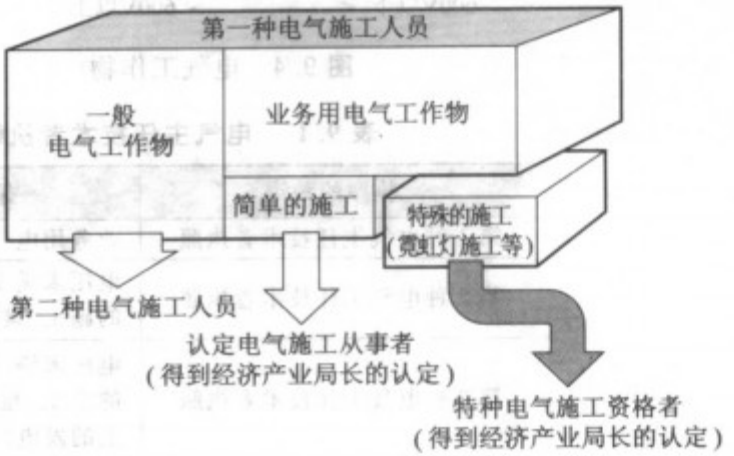


图 9.5 电气施工的范围

表 9.3 电气施工的主要作业内容与范围

只能由电气施工人员从事的作业 (施行规则第 2 条)	除了电气施工人员以外其他人能从事的作业 (施行令第 1 条)
(1) 相互连接电线的作业 (2) 将电线固定在绝缘子上的作业 (3) 将电线直接固定在施工材料等其他物件(绝缘子除外)上的作业 (4) 将电线穿入、放入电线管、线槽、暗渠，或其他类似物品内的作业 (5) 将配线器材固定在施工材料或其他物件上，或在其上连接电线的作业(更换开放式点灭器及开放式插座的作业除外)	(1) 将电线或橡皮绝缘软电缆连接到使用电压在 600V 以下的插入式连接器、插头、接线盒等连接器，或连接在刀形开关、过电流保护器、速动开关等类似开关上的施工 (2) 将电线紧固连接到使用电压为 600V 以下的电气设备(配线器材除外)，或使用电压为 600V 以下的蓄电池的端子上的施工 (3) 安装或拆卸使用电压为 600V 以下的电能计或电流限制器或熔断器的施工

续表 9.3

只能由电气施工人员从事的作业（施行规则第2条）	除了电气施工人员以外其他人能从事的作业（施行令第1条）
(6) 弯曲电线管、切断电线管，或连接电线管与电线管，电线管与分线箱等其他附属品的作业 (7) 在将电线、电线管、线槽、暗渠等其他类似物品贯穿施工材料的部分安装防护装置的作业 (8) 将金属制的电线管、线槽、暗渠等或这些物品的附属品固定在金属网、金属板上的作业 (9) 将配电盘安装在施工材料上的作业 (10) 在一般电气工作物上安装接地线，接地线相互连接或与接地极连接，或将接地极埋设在地下的作业	(4) 用于电铃、内部对讲机、火警传感器、小灯泡或其他类似设备的小型变压器（二次电压限于36V以下）的二次侧配线施工 (5) 设置支持电线的电杆、横担或其他类似工作物，或变更施工 (6) 设置地下电线用的暗渠或管道，或变更施工

电气用品安全法

电气用品安全法是将1999年以前执行的电气用品管理法做了大幅度修订。目的是在规范电气用品的制造、进口、销售等的同时，促进对确保电气用品安全性的民间事业者自主活动，防止发生由电气用品引发的危险及故障。

法律上所说的“电气用品”是在电气事业法里所说的一般电气工作物的部分，以及使用的机器、器具或材料，即在政令中认定的物品。在表9.4中分类为“**特定电气用品**”及“**特定电气用品以外的电气用品**”。表9.5列有电气用品安全法的体系，表9.6为特定电气用品与特定电气用品以外

特定电气用品

特定电气用品以外的电气用品

表 9.4 附在电气用品上的标记

特定电气用品	特定电气用品以外的电气用品
PSE 上面的标记有困难时也可用下面的标记 (PS)E 实际上，在上面标记之外还加上认定或批准、检查机关的标记，制造事业者的名称，额定电压，额定功率等	PSE 上面的标记有困难时也可用下面的标记 (PS)E 实际上，在上面标记之外还加上制造事业者的名称，额定电压，额定功率等

注：PSE标记是英文制造、安全、电工器材三个字的缩写

的电气用品。

表 9.5　电气用品安全法的体系

① 品种指定	
特定电气用品	特定电气用品以外的电气用品
从构造和使用方法以及其他状况看是特别危险或有可能发生故障的电气用品(共 112 种)	特定电气用品以外的电气用品(共 340 种)
② 业务申报	
从事电气用品制造或进口业务者,按照电气用品的区分,从业务开始 30 天以内必须向经济产业大臣申报	
③ 基准适合义务等	
申报者必须制造所申报形式的电气用品,进口业务必须适合技术基准。还要依据经济产业省令的规定进行检查,必须做出检查记录并保存	
(特定电气用品的适合性检查)对于特定电气用品,在销售之前必须接受批准、检查机关的技术标准适合性检查,必须妥善保存取得的适合性证书	
④ 表示及销售的限制	
业务申报者在履行③的义务时,对于所申报电气用品技术标准的适合性,可以按照经济产业省令认定的方式在该电气产品上附加标记(见表 9.3)。从事电气用品的制造、进口及销售业务者如果不附加上述标记(PSE 标记等),就不能销售电气用品或以销售为目的的陈列	
⑤ 产品流通后的措施	
经济产业大臣征收报告,现场检查,禁止表示,下令整改或防止危险等。	

表 9.6　特定电气用品与特定电气用品以外的电气用品

特定电气用品的主要内容	
[电线] 100V 以上 600V 以下 · 绝缘电线(100mm² 以下)橡胶绝缘电线,合成树脂绝缘电线 · 电缆(22mm² 以下,线芯在 7 条以下) · 软电线 · 橡皮绝缘软电缆(100mm² 以下,线芯在 7 条以下) [熔断器] 100V 以上 300V 以下 · 温度熔断器	· 其他熔断器 [配线器材] 100V 以上 300V 以下 · 点灭器(30A 以下)翻转开关,定时开关 · 开关(100A 以下,电动机用为 12kW 以下)开关箱,配线用断路器,漏电断路器 · 接线器(50A 以下,极数 5 以下)插入式接线器　旋入式接线器　电缆交接箱 [电流限制箱] 100V 以上 300V 以下,10A 以下 [小型单相变压器及放电灯用镇流器] 100V 以上 300V 以下,50Hz 或 60Hz

续表 9.6

- 小型单相变压器(50V·A 以下)
- 放电灯用镇流器(放电灯管合计 500W 以下)日光灯用镇流器,水银灯用镇流器

[电热器具]

100V 以上 300V 以下,10kW 以下

- 电热座便器
- 电热水器

[应用电动力的机械器具]

100V 以上 300V 以下,50Hz 或 60Hz

- 电泵(1.5kW 以下)
- 冷冻或冷藏用陈列柜(300W 以下的制冷装置)

[其他交流用电气机械器具]

100V 以上 300V 以下,50Hz 或 60Hz

- 电击杀虫器
- 直流电源装置(1kV·A 以下)

[携带式发电机]

30V 以上 300V 以下

特定电气用品以外的电气用品

[电线及电气温床线]

- 绝缘电线(100mm² 以下)日光灯电线,霓虹灯电线
- 电缆(100V 以上 600V 以下,超过 22mm² 但在 100mm² 以下,线芯在 7 条以下)
- 电气温床线

[电线管及其附属品等]

- 电线管(包括可弯曲电线管,内径在 120mm 以下)
- 地下配线通道(宽 100mm 以下)
- 线槽(宽 50mm 以下)
- 电线管类的附属品(大小头除外)
- 电缆配线用的开关箱

[熔断器]

100V 以上 300V 以下,1A 以上 200A 以下

- 筒形熔断器
- 栓形熔断器

[配线器具]

100V 以上 300V 以下

- 遥控继电器
- 开关(100A 以下,电动机用 12kW 以下)带盖刀闸开关,电磁开关·照明通道,附属品,连接器

[小型单相变压器,电压调整器及放电灯用镇流器]

100V 以上 300V 以下,50Hz 或 60Hz

- 小型单相变压器(500V·A 以下)电铃用变压器,霓虹灯变压器
- 放电灯用镇流器(放电管合计 500W 以下)钠灯用镇流器,杀菌灯用镇流器

[小型交流电动机]

50Hz 或 60Hz

- 单相电动机(100V 以上 300V 以下)
- 笼型三相感应电动机(100V 以上 300V 以下,3kW 以下)

[电热器具]

100V 以上 300V 以下,10kW 以下

- 电热毯
- 电暖桌
- 电暖炉

[应用电动力的机械器具]

100V 以上 300V 以下,50Hz 或 60Hz

- 电冰箱及电冰柜(500W 以下的制冷装置)
- 电钟,换气扇(300W 以下)
- 柜式空调机(电动机 7kW 以下,电热装置 5kW 以下)
- 吸尘器(1kW 以下)
- 洗衣机(1kW 以下)

[光源及应用光源的机械器具]

100V 以上 300V 以下,50Hz 或 60Hz

- 白炽灯泡
- 日光灯
- 白炽灯灯具及放电灯灯具

[电子应用机械器具]

100V 以上 300V 以下,50Hz 或 60Hz

- 内部电话
- 收音机及其他音响设备
- 电视机
- 微波炉

[其他交流用电气机械器具]

100V 以上 300V 以下,50Hz 或 60Hz

- 调光器(1kW 以下)
- 电弧焊接机(超过 150V 的,额定副边电流在 130A 以下)

(摘自标准解答集)

有关电气施工业的业务适当化的法律(电气施工业法)

此法律是规定电气施工业经营者的注册,主任电气施工人员的指定及其他业务,保证电气施工业经营者能正常实施业务,即以有益于保证一般用电气工作物及业务用电气工作物的安全为目的。

对于一般用电气工作物的电气施工业经营者,是注册和指定主任电气施工人员,对于业务用电气工作物的电气施工业经营者则是业务开始通知。

注册　在两个以上的都道府县设置营业所从事营业时,要在通产商业大臣处注册;仅在一个都道府县设置营业所从事营业时,要在所辖的都道府县知事处注册。注册的有效期是5年。

指定主任电气施工人员　电气施工业者在每个营业所从事业务,为了管理一般用电气工作物的施工作业,必须在持有执照的第1种电气施工人员及第2种电气施工人员,而且有从事电气施工3年以上的实际工作经验者当中指定主任电气施工人员。

准备器具及出示标志牌　在每个营业所,电气施工业者处理业务用电气施工时,须备齐绝缘电阻表、高压验电器、继电器试验装置及绝缘耐力试验装置。在处理一般用电气施工时,须备齐绝缘电阻表、接地电阻表及万用表。

标志牌要安置在营业所及每一处电气施工现场的明显处。其内容是人名或名称,注册编号及其他主任电气施工人员的姓名等。

其他有关的电气法规

建设业法　根据建设业法第2条,在建设施工的种类中有"电气施工"的条文。在同法第7条中规定,如果有执照的建设业是电气施工业时,则必须是具备以下条件者:电气工程施工管理人员、电气部门的技术人员、电气施工人员或取得电气主任技术者执照后有5年实际工作经验者。

建筑基准法　根据建筑基准法第32条,建筑物的电气设备必须按照法律或基于法律的法令中与电气工作物有关

的建筑物安全及有关防火规定安装。

劳动安全卫生规则 根据劳动安全卫生规则第280条，对于在有爆炸危险的场所使用的电气机械器具，必须是对不同种类的蒸气或气体有相应的防爆措施。在同规则第287条中有关于消除静电，更有同规则第5章里关于防止因电引起危险的内容条文。

消防法 根据消防法第7条，学校、医院等防火对象的有关人员必须依据政令规定的技术标准设置消防设备等，并实施维护和管理。

消防法施行令及施行规则 在消防法施行令及施行规则中，详细记载了有关消防设备的内容。

3　室内基本配线

要　点

在室内配线施工中，重要的是应了解JIS规定的室内配线图形符号和有关材料、工具的知识，以及室内配线电路设计的基本构思。

解　释

室内配线的JIS标准(C 0304-1984)规定了在一般室内配线的电灯、电力、通信、信号、防灾及避雷设备等的配线、设备，以及在图纸上表示其安装位置、安装方法所使用的图形符号(见表9.7)。

表9.7　室内配线图形符号示例(根据JIS C 0303-1984)

名　称	图形符号	名　称	图形符号
屋顶隐蔽配线 地面隐蔽配线 明配线	——— – – – – – – – – – – –	受电点	
向上引线 向下引线 双向引线		室内空调器	RC
		一般照明用白炽灯，HID灯	
		日光灯	
支线盒或接线盒		插座	
电缆交接箱		点灭器	
接地端子		调光器	
接地中心	EC	遥控开关	$\bullet_R$
接地极		开关	S
		配线用断路器	B

室内配线的材料与工具

电气用品安全法
绝缘电线

使用低压电线、电缆时必须符合**电气用品安全法**的规定。**绝缘电线**就是周围有被覆绝缘物的导线。电缆是在绝缘电线的外面又加上其他被覆物以保护绝缘电线不受机械损伤或潮湿。其种类与符号汇总示于表9.8，其中主要的示于图9.6。

表 9.8 绝缘电线及电缆的种类及符号

名 称	符 号	名 称	符 号
① 绝缘电线		④ 电缆	
600V 乙烯基绝缘电线	IV	耐热电缆	HP
600V2 类乙烯基绝缘电线	HIV	橡胶绝缘氯丁橡胶封套电缆	RN
室外用乙烯基绝缘电线	OW	聚乙烯绝缘乙烯基电缆	EV
引入用乙烯基绝缘电线	DV	混凝土直接埋设用乙烯基绝缘乙烯基封套电缆	CB-VV
高压机器内配线用乙烯丙烯橡胶绝缘电线	KIP		
高压引下用交连键聚乙烯绝缘电线	PDC	交连键聚乙烯绝缘乙烯基封套电缆	CV
高压引下用乙烯丙烯绝缘电线	PDP	交连键聚乙烯绝缘聚乙烯封套电缆	CE
室外用聚乙烯绝缘电线	OE	乙烯基绝缘乙烯基封套电缆(圆形)	VVF
室外用交连键聚乙烯绝缘电线	OC	乙烯基绝缘乙烯基封套电缆(扁平形)	VVR
霓虹灯用乙烯基绝缘电线	NV		
霓虹灯用乙烯基绝缘乙烯基封套电缆	NEV	无机绝缘电缆	MI
② 软线		乙烯基绝缘 CD 电缆	CD-V
橡胶绝缘圆编织软线	RF	控制用乙烯基绝缘乙烯基封套电缆	CVV
橡胶绝缘双层筒编织软线	FF	⑤ 引出线	
乙烯基扁平软线	VFF	引出用氯丁合成橡套电线	LAN
双绞乙烯基软线	VTF	引出用硅橡胶绝缘玻璃编织电线	LKGB
③ 橡胶绝缘软电缆		⑥ 通信用电缆	
2 类橡胶绝缘软电缆	2CT	市内聚乙烯绝缘聚乙烯封套电缆	CPEE
3 类橡胶绝缘软电缆	3CT	市内聚乙烯绝缘乙烯基电缆	CPEV
2 类氯丁橡胶绝缘软电缆	2RNCT	通信用室内乙烯基扁平电线	TIVE
3 类氯丁橡胶绝缘软电缆	3RNCT	电视接收用同轴电缆	TVECX
乙烯基橡胶绝缘软电缆	VCT		



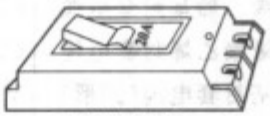
图 9.6 主要电线及电缆的构造

电气施工用的器材与工具种类繁多。随不同用途器材的种类也各异。要针对施工场所正确选用工具。有代表性的器材示于表9.9，工具示于表9.10。

表9.9 电气施工用的器材

(1) 断路器

① 配线用断路器：能自动切断过电流的电路



配线用断路器

额定电流/A	动作时间/min	
	额定电流的1.25倍	额定电流的2倍
30以下	60	2
50以下	60	4
100以下	120	6
255以下	120	8

② 熔断器：过电流时熔化，自动切断电路

③ 漏电断路器：检测出泄漏电流，自动切断电路

④ 电流限制器：用于销售或购买电力，由电力公司安装

⑤ 温度熔断器：超过一定温度时熔化，自动切断电路

(2) 开关及点灭器

① 开关箱：主要用作低压电动机的手动开关

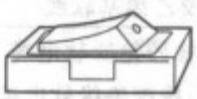
② 电磁开关：利用电磁力的开关，是用于电动机的运行或遥控操作

③ 盖顶开关：装在照明灯具的法兰内，以控制灯的点灭

④ 拉线开关：房屋中间的开关

⑤ 船形开关：用于嵌入式开关盒或外露式等

⑥ 自动点灭器：房间达到一定暗度时点灯，到一定亮度时熄灯



嵌入式船形开关

(3) 连接器等

① 插座：有嵌入式、外露式或带有接地极的防水型等多种

② 密封支线盒：连接室内配线与电灯线

③ 连线器：将图示电线相互连接

④ 电缆交接盒：在室内配线时使电缆相互连接的盒子

⑤ 环套：在接线盒内连接电线的零件

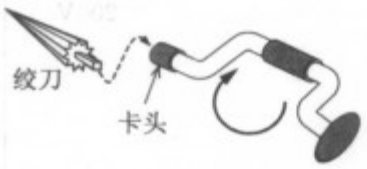
⑥ 接插件：在接线盒内插接电线的部件



表9.10 电气施工用的工具

用 途	使用工具
① 切断电线	钳子、断线钳、电缆刀
② 剥电线皮	电工刀、剥线钳
③ 连接电线	压接钳

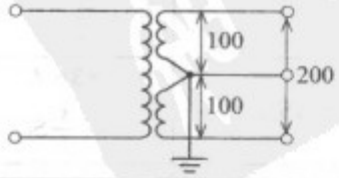
续表 9.10

用 途	使用工具
④ 截断金属管	钢锯、切管刀
⑤ 弯曲金属管	弯管器、油压弯管器
⑥ 金属管套扣	板牙，带丝
⑦ 金属管的端面加工	扩孔钻，卡头，锉刀
	
⑧ 金属管相互连接，与箱、盒类的连接	钳子，扳手，扁嘴钳，活扳手，管钳
⑨ 安装螺钉	改锥，钳子
⑩ 截断塑料管	钢锯，塑料管割刀
⑪ 弯曲塑料管	喷灯
⑫ 塑料管的端面加工	塑料管端面刀
⑬ 混凝土钻洞	电钻，冲击钻，钢钎，榔头
⑭ 拧入螺钉	射钉枪，膨胀螺栓
⑮ 混凝土上安装螺栓	电钻，手摇钻
⑯ 木材钻孔	绞刀、卡头

电气方式与配线方式

主要电气方式示于表 9.11。如果电力损失相同，在同样距离用同样材质的电线输电时，使用电线量的比较示于表 9.12。

表 9.11 常用电气方式

电气方式	连接方法及电压/V	负 载
单相 2 线制 100V		一般电灯 家庭用电器单相电动机
单相 3 线制 100V/200V		除 100V 外，也可接 200V 的机器

续表 9.11

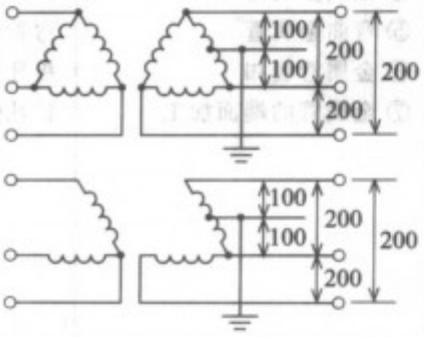
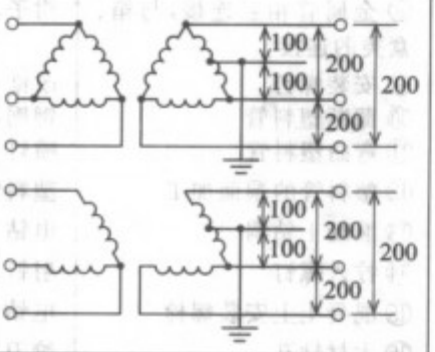
电气方式	连接方法及电压/V	负　载
三相3线制 200V		除三相感应电动机外，也可以接单相200V的负载
三相4线制 100V/200V		将单相3线制与三单相3线制合在一起的

表 9.12　使用电线量的比较

	单相2线制	单相3线制	三相3线制
供电功率($\cos\theta=1$)	$P=V_0I_0$ $=100I_0$	$P=V_0I_0$ $=2\times100\times I_2$	$P=\sqrt{3}V_1I_3$ $=\sqrt{3}\times200\times I_3$
线电流	I_0	$I_2=\dfrac{I_0}{2}$	$I_3=\dfrac{I_0}{2\sqrt{3}}$
功率损耗 (对称负载)	$P_1=2I_0^2R_0$ $=2I_0^2\rho\dfrac{1}{S_0}$	$P_1=2I_2^2R_2$ $=2\times\left(\dfrac{I_0}{2}\right)^2R_2$ $=\dfrac{1}{2}I_0^2\rho\dfrac{1}{S_2}$	$P_1=3I_3^2R_3$ $=3\times\left(\dfrac{I_0}{2\sqrt{3}}\right)^2R_3$ $=\dfrac{1}{4}I_0^2\rho\dfrac{1}{S_3}$
电线的截面积	S_0	$S_2=\dfrac{S_0}{4}$	$S_3=\dfrac{S_0}{8}$
电线用量(中线与火线同样粗细)	$W_0=2S_0l$	$W_2=3S_2l$ $=\dfrac{3}{4}S_0l$	$W_3=3S_3l$ $=\dfrac{3}{8}S_0l$
比较	100	37.5	18.75

干线的设计与支线

干线的容许电流与干线短路器所需容量　图 9.7 是干线的设计示例。可看出作为电动机负荷的额定电流之和 I_M 与除外电动机的用电设备额定电流 I_H 之和的大小关系。

过电流断路器的省略条件　在干线的电源一侧的电路，为了保护干线，原则是在距离支线点 3m 以内设置过电流断路器，但安装位置可以超过 3m 的条件示于图 9.8。

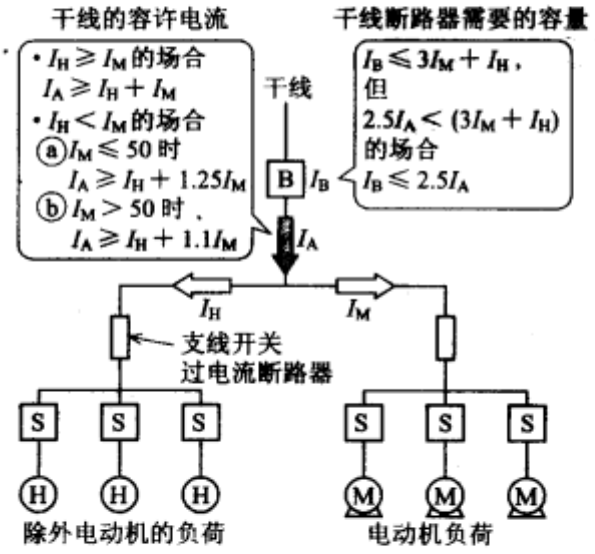


图 9.7　干线的设计

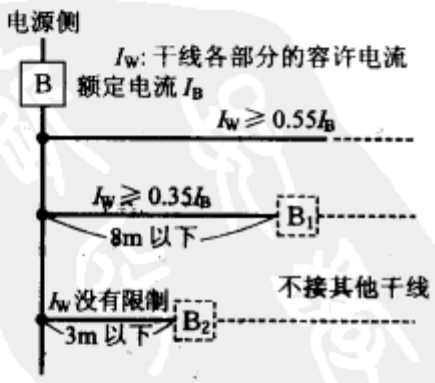


图 9.8　能省略过电流断路器的条件

支线的设施　图 9.9 表示从低压室内干线分出来的支线必须从支线点开始，在电线长度为 3m 以内的地点设置开关及过电流断路器。图中支线电路的种类可供参考。

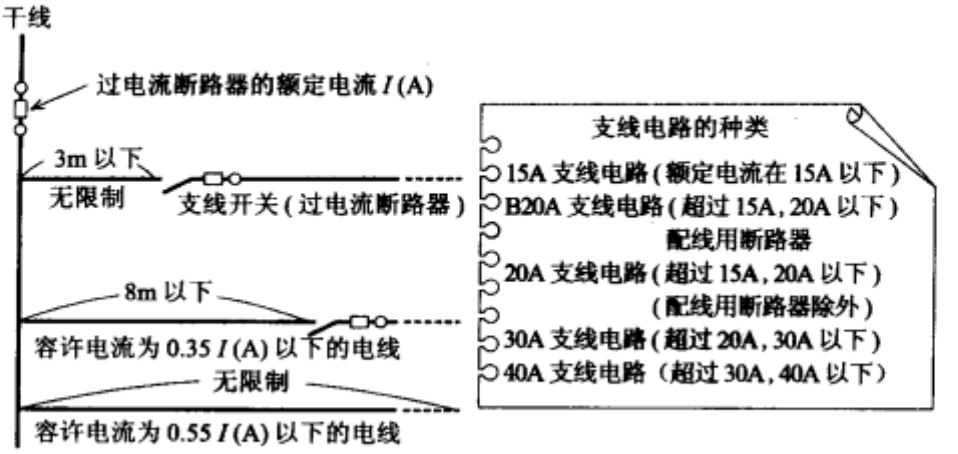
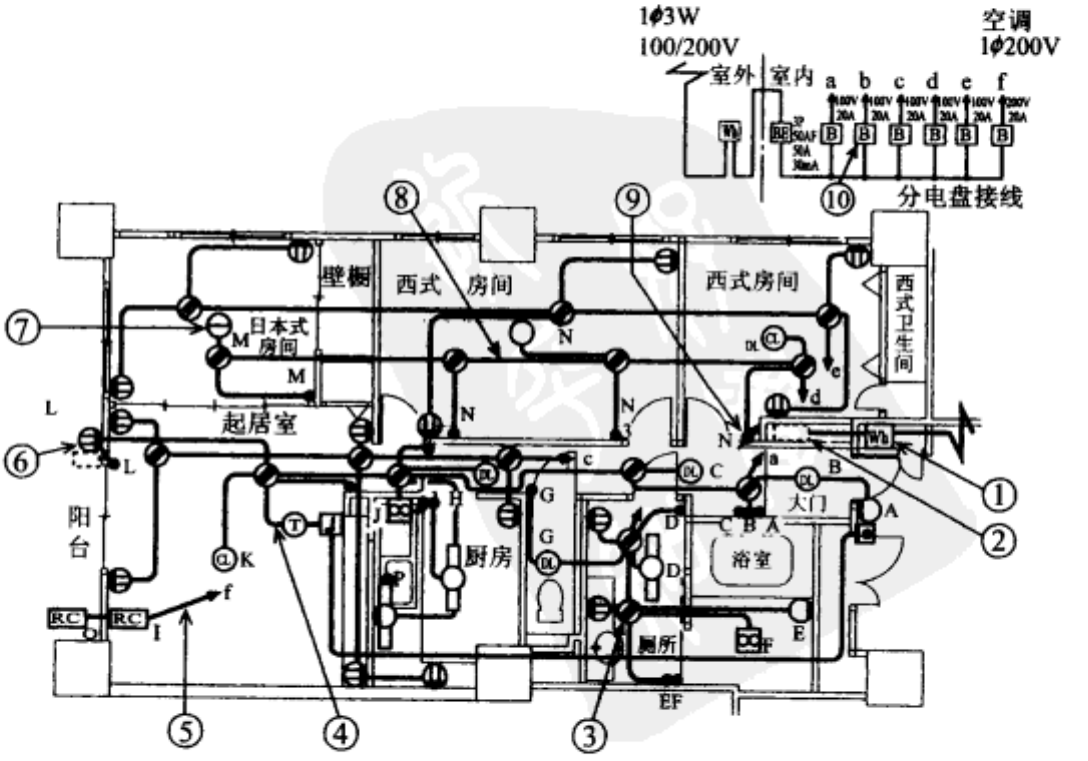


图 9.9　支线开关与过电流断路器的设置

例　题

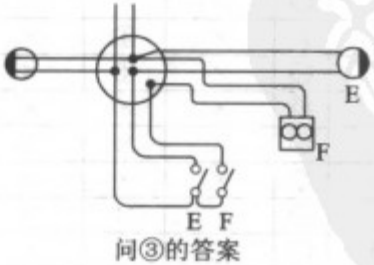
例 图示钢筋混凝土住宅楼中一户的电路配线。图中箭头指示的 10 处问题有 4 个用 a、b、c、d 标出的答案。请对各问题选择一个正确的答案。室内配线施工除非有特别标记，都是使用 600V 乙烯基绝缘乙烯基封套电缆(VVF)的电缆施工；电线的根数及粗细忽略；图形符号原则上是依据 JIS C 0303-2000(新



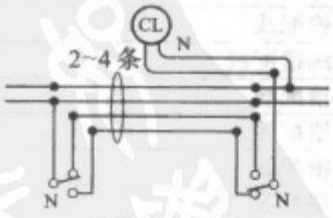
图形符号)；图中与问题没有直接关系的部分省略未画。

问	答
① 部分图形符号的名称？	(a)电流互感器 (b)电度表 (c)开关 (d)漏电报警器
② 部分安装了分电盘，图形符号？	(a) (b) (c) (d)
③ 部分电缆交接箱内哪个电线的接法正确？	(a) (b) (c) (d)
能用在④部分电线(软钢线)的最小直径？	(a)0.8 (b)1.2 (c)1.6 (d)2.0
⑤ 部分使用可弯曲塑料软管施工，正确的图形符号是？	(a) 2.0 E2.0(E19) (b) 2.0 E2.0 (VE16) (c) 2.0 E2.0 (PF16) (d) 2.0 E2.0 (CD16)
⑥ 部分是防水(雨)型插座，图形符号的标注字母是？	(a)WP (b)H (c)EX (d)LK
⑦ 部分安装白炽灯，适合用作电灯线的类型及最小粗细的组合是？	(a)乙烯基软线 (b)乙烯基绝缘电线 (c)橡胶绝缘软线 (d)双层筒编织橡胶软线
⑧ 部分电线的最少芯线数是多少？	(a)3 (b)4 (c)5 (d)6
⑨ 部分图形符号的器具是？	(a)双向引线 (b)向上引线 (c)遥控开关 (d)调光器
使用⑩部分图形符号器具的目的是？	(a)切断过电流及对地短路电流 (b)切断对地短路电流 (c)切断过电流 (d)切断不对称电压

答 1(b) 2(c) 3(a) 4(c) 5(c)
6(a) 7(d) 8(b) 9(d) 10(b)



问③的答案



问⑧的答案

4　施工场所与配线方法

要　点

理解有关施工场所及各种配线方法(电缆施工,电线管施工,线渠施工,平面保护层施工等),如表9.13所示。

解　释

施工场所与配线方法

表9.13　施工场所与配线方法

(摘自《解释》174条,《内规》第3102节)

施工场所 / 配线方法		室内						房墙外	
		露出场所		隐蔽场所					
				可检查场所		不可检查场所			
		干燥场所	有水场所或湿气大场所	干燥场所	有水场所或湿气大场所	干燥场所	有水场所或湿气大场所	雨线内	雨线外
绝缘子牵引配线		◎	◎	◎	◎	×	×	①	①
金属管配线		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
合成树脂管	CD管除外	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	CD管	②	②	②	②	②	②	②	②
金属软管配线	一种金属制的软管	③	×	③	×	×	×	×	×
	两种金属制的软管	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
金属排线管配线		○	×	○	×	×	×	×	×
合成树脂排线管配线		○	×	○	×	×	×	×	×
地表排线槽配线		×	×	×	×	④	×	×	×
分格式排线槽配线		×	×	○	×	④	×	×	×
金属排线槽配线		◎	×	◎	×	×	×	×	×
照明排线槽配线		○	×	○	×	×	×	×	×
总线排线槽配线		◎	⑤	◎	×	×	×	⑥	⑥
扁平保护层配线		×	×	○	×	×	×	×	×
乙烯基封套电缆		○	○	○	○	×	×	⑦	⑦
电缆(封套电缆以外)		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎

◎:可以施工

○:如果使用电压在300V以下可以施工

×:不可施工

①:如果是露天场地及可以检查的隐蔽场所,可以施工

②:直接埋设在混凝土中的场合除外,如果使用专用的不燃性或有自消性的难燃性配线管,可以施工

③:使用电压超过300V时,如果接在电动机的短小部分采用可弯曲的金属软管配线,可以施工

续表 9.13

④:使用电压在 300V 以下,如果在混凝土的地面内,可以施工
⑤:使用电压在 300V 以下,如果使用室外用的配线管(不能检查的隐蔽场所除外),可以施工
⑥:使用电压在 300V 以下,如果使用室外用的配线管(不能检查的隐蔽场所除外),可以施工。当使用电压超过 300V 时,如果使用防溅型室外用的母线管道,且设置在非木制营造物的场合(不能检查的隐蔽场所除外),可以施工
⑦:使用电压在 300V 以下,如果是露天场所或能检查的隐蔽场所,可以施工
*《电技》:规定有关电气设备技术基准的省令
《解释》:电气设备技术基准的解释
《内规》:电气技术基准调查委员会编《内线规程》(社)日本电气协会(2000)

电缆施工

有关电缆施工的内容示于表 9.14。

表 9.14 用电缆施工方式进行低压室内配线的施工方法(摘自《电技》56、57 条,《解释》187 条,《内规》3156、3170、3175、3180、3185、3190 节)

施工方法	特 点	支 持	弯 曲	施工方法
乙烯基外皮电缆	使用 23 条乙烯基绝缘电线及乙烯基绝缘外皮的电缆。与其他施工比较,作业简便而且经济,可用在所有场合,因此得到广泛使用。有扁平(VVF)及圆形(VVR)	在营造物的侧面或下面施工的场合要在 2m 以下(人没有触及的危险时要在 6m 以下)	为了不损伤被覆物,弯曲部分内部的半径原则取直径的 6 倍(单芯线取 8 倍以上)	不可设置在有重物的压力或受到机械冲击的场所。但若有适当防护措施不受此限
混凝土中直接埋设电缆	使用强化耐冲击性的电缆混凝土,可直接埋设在混凝土中。用乙烯基作绝缘体的是 CB－VV;用聚乙烯作绝缘体的是 CB－EV	原则是沿着钢筋埋设,而且要用绑线在 1m 以下的间隔固定在钢筋上	依据乙烯基外皮电缆配线	要距离钢筋头 3cm 以上的距离;要距离门框、窗框、焊接的组合金属件等 10cm 以上
铅皮电缆 铝皮电缆	用于管路式地下配线,有铅或铝的外皮	依据乙烯基外皮电缆配线	为了不损伤被覆物,原则是电缆弯曲部分内侧的半径是电缆完成外径的 12 倍以上	依据乙烯基外皮电缆配线。但是在钢带铠装铅皮电缆或铁线铠装铅皮电缆的场合可以省去防护装置

续表 9.14

施工方法	特　点	支　持	弯　曲	施工方法
橡胶绝缘软电缆	主要用作移动电线，用于埋设时按右栏处理	沿着营造材料或机架铺设时，间隔要在 1m 以下	必须注意不得损伤被覆物	依据乙烯基外皮电缆配线
MI 电缆	有耐热性、耐燃性、耐气候性，机械强度也好，所以用在火力发电厂、铸造工厂等高温场所的配线	依据乙烯基外皮电缆配线	为了不损伤金属外皮，弯曲部分内侧的半径是电缆外径的 6 倍以上	在受到重物的压力或有明显机械冲击的场所要采取适当防护措施

电线管施工

表 9.15 是关于电线管施工的内容。

表 9.15　低压室内配线用电线管施工的方法(摘自《电技》56、57 条；《解释》177、178、180 条；《内规》3110、3115、3120 节；其他)

施工方法	合成树脂管	金属管	可弯曲电线管
特点	一般使用硬聚氯乙烯管。与金属管比较是绝缘性能好，不用担心漏电。一部分药品除外，耐腐蚀性也好。质量轻，施工方法简便，但机械强度及耐热性差	使用厚钢、薄钢金属管或无螺纹电线管施工，耐机械冲击或重物的压力	有一种金属制的可弯曲电线管及两种金属制的可弯曲电线管。后者与电缆或金属管同样可在任何场所施工
电线	① 要使用绝缘电线(室外用乙烯基绝缘电线(OW 线)除外) ② 要使用绞线(穿在短小的电线管中或直径在 3.2mm 以下的除外)		
连接点	电线在管中不允许有接头		
管及附属品的选定	① 要符合电气用品安全法的规定 ② 管壁的厚度在 2mm 以上(CD 管除外)	① 要符合电气用品安全法的规定 ② 管壁的厚度，埋设在混凝土中厚度在 1.2mm 以上，除此之外在 1mm 以上	① 要符合电气用品安全法的规定 ② 一种金属制的可弯曲电线管厚度在 0.8mm 以上
电线管的称呼(粗细(mm))	接近内径的偶数值	厚钢：接近内径的偶数值；薄钢：接近外径的奇数值	一种金属制管：接近内径的奇数值；另一种金属制管：接近内径的数值

续表 9.15

施工方法	合成树脂管	金属管	电线软管
标准长	4m	3.66m	一种金属制管：10m、15m、30m；另一种金属制管100m、50m、20m
施工方法	① 管之间或管与电线盒之间插入深度是管外径的1.2倍(若使用黏合剂是0.8倍)以上，而且插入连接要牢固 ② 管的支持点之间的距离要在1.5m以下	① 管之间或管与电线盒等其他附属物之间要用螺纹连接，或用具有同等以上效力的方法，牢固而且必须在电气上可靠连接 ② 管的支持点之间的距离要在2m以下	① 管之间的连接或管与电线盒等其他附属物之间用专用的管接头，不但要牢固，而且必须在电气上可靠连接 ② 管的支持点之间的距离，沿着营造材料的侧面或下面水平设置时，要在1m以下(其他为2m)

其他施工

表9.16表示各种排线槽的施工及平面保护层的施工。另外，特殊设施的配线示于表9.17，特殊场所的配线施工示于表9.18。

表9.16 用排线槽配线施工及平面保护层施工的低压室内配线施工方法
(摘自《电技》56、57条；《解释》181～186条；《内规》3135、3140、3145、3150、3155、3160节)

施工方法	地表排线槽配线	分格式排线槽	金属排线槽配线	总线排线槽配线	照明排线槽配线	扁平保护层配线
特点	在办公室或工厂等地，当计算机、电话机、电灯等的位置需要变更或增设时，在任何地点都容易得到电源或信号	是把波纹形封闭盖板的沟作为排线槽，成为楼房等大型建筑物的一部分。因此很容易增设电气设备或变更位置，用途很广	用于从工厂或大楼等的电气室引出许多低压干线的场合使用	用绝缘物将金属制排线槽中的铜带或铝带等导体固定。用于大电流干线的配线	通过专用的插头向商店内的照明或小型电气设备供电的配线方式	也叫地毯下配线。布设在事物所、展台、商店等的地毯下

续表 9.16

施工方法	地表排线槽配线	分格式排线槽	金属非线槽配线	总线排线槽配线	照明排线槽配线	扁平保护层配线
电线(导体)	① 要使用绝缘电线(室外用乙烯基绝缘电线除外) ② 电线直径超过 3.2mm 时要使用绞线(金属排线槽除外)			断面积在 20 mm^2 以上的铜带、或 5mm 以上的铜管、圆铜棒	照明排线槽配线的本体	扁平导体合成树脂绝缘电线
连接点	在排线槽内不允许有连接点,但是在容易检查的支线场所不在此限					要用专用连接器
使用电压[支持物的间隔]	300V 以下	300V 以下	(3m 以下)	(3m 以下)	300V 以下[2m 以下(1 根电线 2 处)]	对地电压 150V 以下
排线槽及附属品	符合电气用品法的	要使用钢板	宽度超过 5cm 厚度在 1.2mm 以上的铁板	必须符合 JIS C 8364 的规定	原则上要有日本工业标准 JIS 的图形标志	要符合 JIS C 3652 的规定
施工方法	① 终端要封闭 ② 连接要牢固,而且要有可靠的电气连接(照明排线槽配线必须机械、电气都可靠连接) ③ 施工时必须注意使低洼处不存水				④ 施工要使开口部朝下	* 要使用专用支线电路(过电流断路器:30A 以下)
					* 不可贯穿营造材料	

表 9.17　特殊设施的配线(摘自《电技》56、57 条;《解释》198、237 条;《内规》3205～3207、3560 节)

特殊设施	使用电压	使用电线	备　注
小功率电路	60V 以下(由专用变压器供电)	安装在营造材料上的施工:使用电缆的场合除外,用直径是 0.8mm 以上的软铜线或同等以上的导线。埋设在地下的场合,用 IV 电线、橡胶绝缘电缆或电缆。架空施工的场合,用直径是 1.2mm 以上的硬铜线或同等以上的导线	是用于遥控或信号等的电路,最大使用电流如下 最大使用电压 / 最大使用电流 15V 以下 / 5A 以下 30V 以下 / 3A 以下 60V 以下 / 1.5A 以下

续表 9.17

特殊设施	使用电压	使用电线	备 注
橱窗、展柜等的内部配线	300V 以下	断面积在 0.75mm² 以上的电线或橡胶绝缘电缆	如果是设置在干燥场所而且内部是在干燥状态使用的场合，并且从外部容易看到的地方，可以将电线或橡胶绝缘电缆配线在营造材料上。安装点之间的距离在 1m 以下，而且不能使配线承受电灯泡或灯具的质量

表 9.18 在特殊场所的低压室内配线施工

（摘自《电技》68～70 条；《解释》1921～1995 条；《内规》第 3 篇第 4 章）

特殊场所	施工的种别及其他
① 有爆燃性粉尘[1]的场所 ② 有可燃性气体的场所	金属管施工　电缆施工（橡胶绝缘电缆施工除外）
③ 有可燃性粉尘[2]的场所 ④ 有危险品[3]的场所 ⑤ 在制造火药类及存在火药类的场所，火药库以外的场所	金属管施工　电缆施工　合成树脂管施工（厚度不到 2mm 的合成树脂制电线管及 CD 管施工除外）
⑥ 粉尘多的场所，①、②以外的场所（装备有效除尘装置的除外）	绝缘子牵引施工，合成树脂管施工，金属管施工，可弯曲电线管施工，金属排线槽施工，总线排线槽施工（换气型排线槽除外），电缆施工
⑦ 火药库内	原则上不能设置电气工作物。但对地电压在 150V 以下，对白炽灯或日光灯供电的场合，允许以下的施工。 金属管施工　电缆施工（橡胶绝缘电缆施工除外）
⑧ 有腐蚀性气体或液体散发的场所[4]	要实施适当的涂装或适当的预防方法，使电气工作物不受腐蚀性气体或溶液的侵害

1）：镁粉、铝粉等粉尘。

2）：面粉、淀粉、煤粉等粉尘。

3）：赛璐珞、火柴、石油类等。

4）：指酸、碱类，漂白粉等的制造厂或电镀厂等。

接地施工

接地施工是为了对于人或建筑物防止因漏电引起触电或火灾以及对电气设备的损坏。表 9.19 示出了 4 种接地施工。

表 9.19　接地施工(摘自《电技》10、11 条;《解释》19～21 条;《内规》1350 节;《高规》[1] 第 1 篇第 1 章 160 节)

接地施工的种类	按用电器具区分	接地电阻值		接地线的粗细
A 种接地施工	① 高压或超高压电气设备 ② 避雷器			① 直径 2.6mm 以上的软铜线,或与此同等以上的导线 ② 断面积 14mm²
B 种接地施工	高压或超高压电路及与低压电路耦合的变压器低压侧的中点	150 / I(Ω)以下(I:高压侧的一线对地短路电流值)	由于变压器高、低压的混触,使低压侧电路的对地电压超过 150V 的场合, ① 有能在 1s 内自动切断电路的装置时,150～600Ω ② 在 2s 以内,150～300Ω	① 直径 4mm 以上的软铜线或与其同等以上的导线 ② 15kV 以下的超高压及高压变压器的场合,用直径 2.6mm 以上的软铜线
C 种接地施工	使用电压超过 300V 的低压电器	10Ω 以下	当设置了自动切断电路的装置,在电路发生接地时能在 0.5s 内切断电路时,在 500Ω 以下	直径 1.6mm 以上的软铜线或与其同等以上的导线
D 种接地施工	使用电压在 300V 以下的低压电器	100Ω 以下		

1)《高规》:高压受电设备规程(JEAC 8011-2022)。

电线的连接

电线的连接必须按照以下规定进行:

① 不能使电线的电阻增加。

② 不能使电线的强度(抗拉负荷)减少 20%以上。

③ 在连接部分使用接线管或其他接线器具,并且要锡焊。

④ 绝缘电线互相连接时,在连接部分必须用与被连接电线的绝缘物有同等以上绝缘力的绝缘物实施充分被覆。

电线的具体连接方法及原则见图 9.10。

(a) 直线连接

① 细单线(2.6mm以下)的直线连接(双扭)

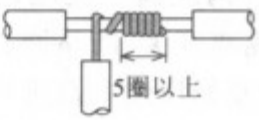


② 用对接套管(B型)的压接(参照JIS C 2806)

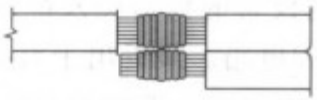


(b) 支线连接

① 细单线(2.6mm以下)的支线连接

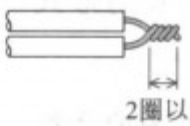


② 用T型套管的支线连接

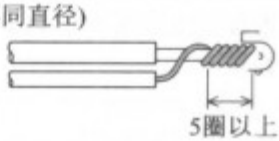


(c) 终端连接

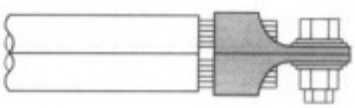
① 细单线(2mm以下)的终端连接



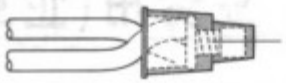
② 细单线(2mm以下)的终端连接(不同直径)



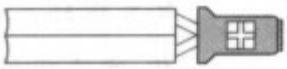
③ 用压接端子连接(参照JIS C 2805)



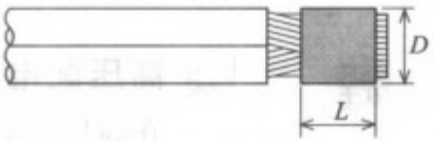
④ 用旋入式电线套管连接



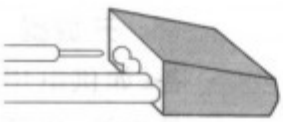
⑤ 用环套连接(E型)



⑥ 用直线叠接套管(P型)连接

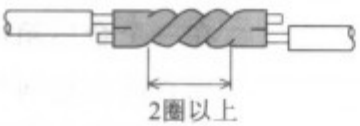


⑦ 用插入式连接器连接

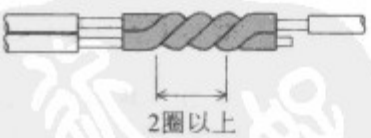


(d) 用套管连接

① 用S型套管直线连接



② 用S型套管支线连接



③ 用封套直接连接

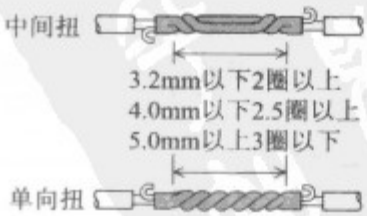


图 9.10 铜电线的连接方法(摘自《电技》7条;《解释》12条;《内规》1335～1338)

5　业务用(企业自用)高压配电变电设备

要　点

在工厂、大楼中的电气设备，称为业务用(企业自用)电气工作物。将电力公司的高压配电线路得到的6 600V电力，变成适合电灯、动力负荷等用途电压(100V或200V)的电气设备称为自用高压配电、变电设备。

解　释

高压配电设备的种类及形式

在高压配电设备中有不装在箱中的开放型与装在铁箱中的密闭型。

开放型　在配电室内设置构成高压配电设备的机器设备(如供电用或仪用互感器、隔离开关、断路器、变压器等)并且配线，用开放型高压配电盘及低压配电盘进行监视控制的装置。

密闭型　将构成高压配电设备的机器类及配线一体化在一个金属箱内，就是密闭型配电箱。最近出于对高压配电设备的占地面积小、工期缩短、安全可靠性好等方面的考虑，密闭型配电箱正在得到广泛的应用。

高压配电设备按照主断路装置的形式可以分类为CB型、PF·S型(见表9.20和表9.21)

表9.20　根据主断路装置对高压配电设备的分类

CB型	电源侧 CB 负荷侧	使用高压交流断路器(CB)作为主断路装置
PF·S型	电源侧 LBS PF 负荷侧	将高压限流熔断器(PF)与高压交流负荷开关(LBS)组合起来作为主断路装置

表 9.21　主断路装置的形式与设置场所、设备容量

(摘自《高规》第 1 篇第 1 章 110 节)

设置场所			CB 型	PF・S 型
不装在箱内		室外式	无容量限制	150kV・A 以下
		杆上式	不使用	100kV・A 以下
		地面式	无容量限制	150kV・A 以下
	室内式		无容量限制	300kV・A 以下
装在箱内	密闭型配电设备(根据 JIS C 4620 的规定)		2000kVA 以下	300kV・A 以下
	上述以外的设备[1)]		无容量限制	300kV・A 以下

1) 根据 JIS C 4620 的规定或适合 JEM 1425 的设备。

高压引入线的施工

架空引入线
地下引入线

高压引入线分为**架空引入线**与**地下引入线**。在保安上的责任分界点应根据与电力公司的协议按下列要求施工：

① 在保安责任分界点需要安装在维护检修时分隔电路的分区开关。但如果电力公司设置有自用电引入线专用支线开关的场合，可以在靠近责任分界点的地方安装分区开关。

② 分区开关要使用能通、断负荷电流的高压交流负荷开关。但如果电力公司设置有自用电引入线专用支线开关的场合，可以使用断路器作为分区开关。

③ 在保安责任分界点负荷一侧的电路上，要在靠近责任分界点的地方设置主隔离装置。

④ 主隔离装置应充分保证与电力公司变电所的过电流保护装置的动作协调(灵敏度及延时)，而且要保证与受电用变压器副边的过电流断路器(配线用断路器、熔断器)的动作协调一致。

⑤ 在保安责任分界点上要设置对地短路切断装置。但如果在保安责任分界点的近旁装有对地短路切断装置，不会有因对地短路引起波及事故的危险时不在此限。

⑥ 对地短路切断装置需充分保证与电力公司变电所的对地短路切断装置的动作协调一致。

高压电缆
高压绝缘电线

高压架空引入线　高压架空引入线使用**高压电缆**或**高压绝缘电线**。使用高压电缆及悬挂线(吊线)和挂钩的布线方法示于图 9.11。

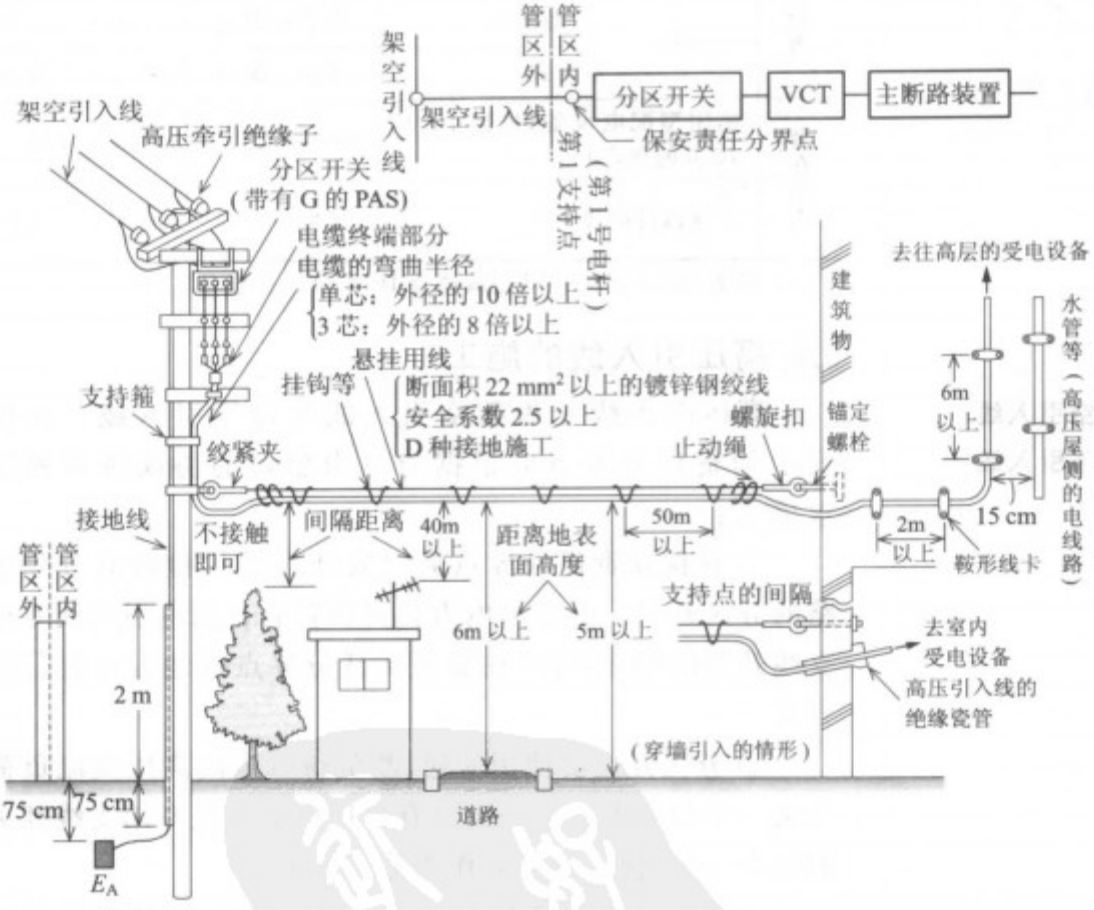


图 9.11　用高压电缆的架空引入示例

悬挂线使用断面积 22 mm² 的镀锌钢绞线或与其同等以上强度的金属绞线。采用 D 种接地施工，而且还要考虑能够经受积雪等特殊条件下的想象负荷。安全系数要在 2.5 以上。

高压地下引入线　图 9.12 表示高压电缆的地下引入线施工。高压电缆多使用 CV 电缆(交链键聚乙烯绝缘乙烯基外皮电缆)或 CVT 电缆(三层交链键聚乙烯绝缘乙烯基外皮电缆)。电缆的防护范围推荐为地面上 2m 内，到地面

下 20cm。

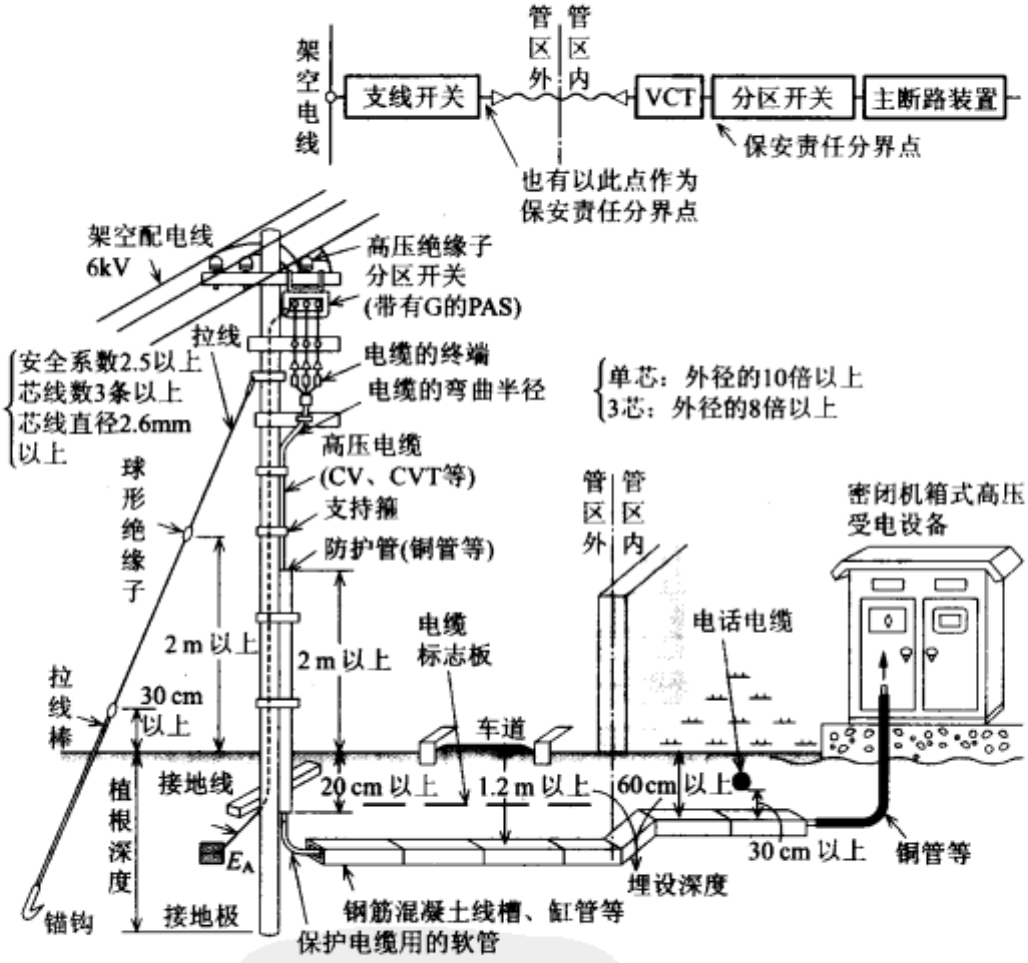


图 9.12　用高压电缆的地下引入线示例

高压受电设备的电力流程

高压受电设备的目的是将从高压接受的电力变成适于负荷使用的安全电力。高压受电设备的构成及设置是要在发生事故时，能实行适当的动作将事故限制在最小范围内，以保证不波及其他电路或电源侧。图 9.13 是高压受电设备的电力流程，组成如下：

分区开关
零相电流互感器

① 电力经过设置在保安责任分界点的**分区开关**(带有对地短路切断装置的高压交流开关)及**零相电流互感器**以检测对地短路电流，然后到电缆头。一般在受电点装有分区开关(带有 G 的 PAS)的场合，在受电设备的一侧就不必装零相电流互感器。此外，设置对地短路切断装置的目的是防止

用户发生对地短路事故时波及到电力系统一侧，因此要尽量安装在靠近电源处。

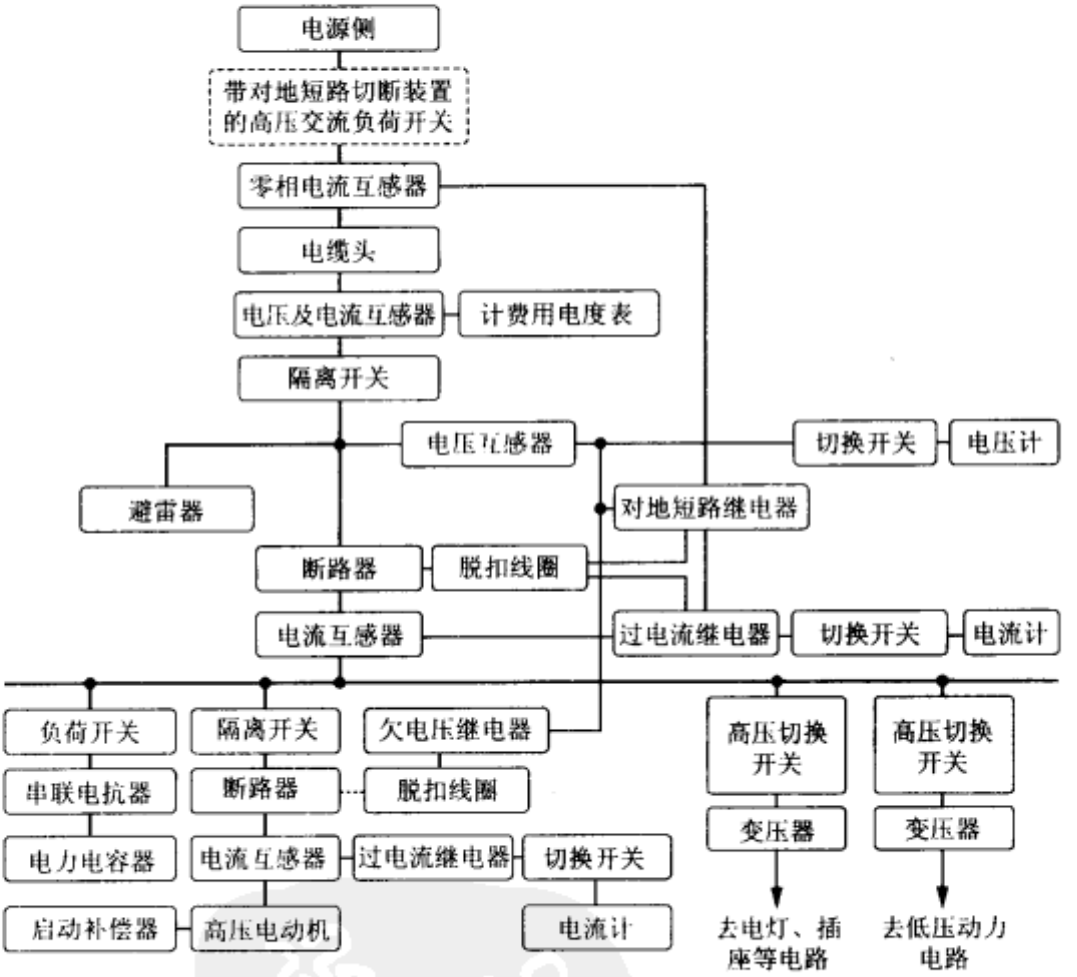


图 9.13　高压受电设备的电力流程

电压互感器及电流互感器

隔离开关

② 经过**电压互感器及电流互感器**是为了对用电量进行计费，互感器接在隔离开关的电源侧。**隔离开关**是将负荷电路与电源完全隔断的重要电器，用断路器将负荷电路断开后再利用绝缘钩棒手动操作打开隔离开关(不能用隔离开关切断负荷电流)。

避雷器

③ 从隔离开关的负荷侧分支出**避雷器**及电压互感器。设置避雷器的目的是当由于雷击或电路在通、断而产生的异常电压侵入用电设备时，能向大地放电，降低电压的峰值，以保护机器的绝缘。所以避雷器应该尽量靠近电源，而且是设置在容易检查(有、无异常或测定接地电阻等)的地方。

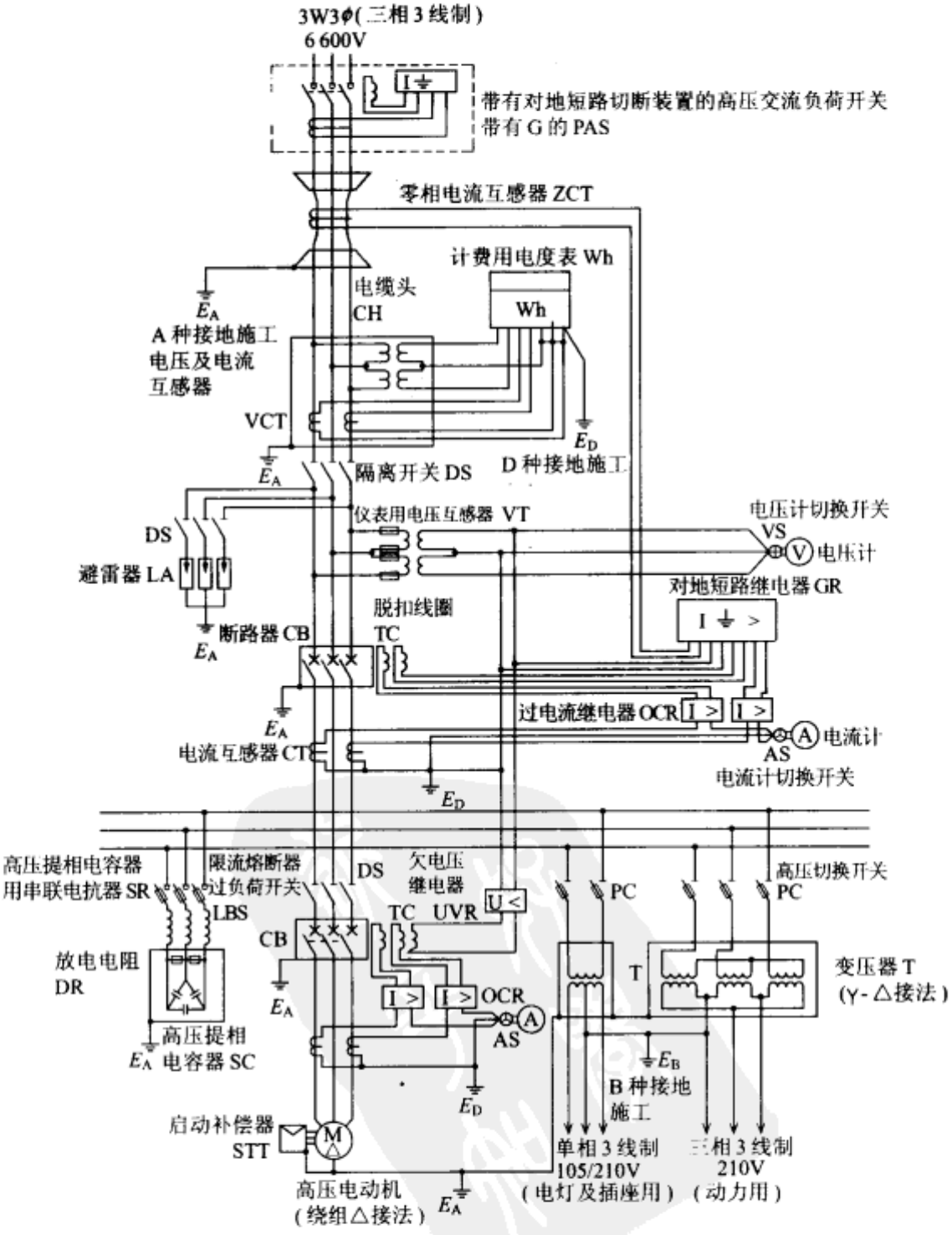


图 9.14 高压受电设备的复线接线

断路器

④ **断路器**的作用是当电路中流过异常电流(过电流或对地短路电流)时,来自各种继电器的切断信号使脱扣线圈起作用,切断高压电路,以保证安全。随着这个主断路装置的形式不同,用电容量就有限制(参照《高压用电设备的种类与形式》)。

互感器开关
电流表
过电流继电器

⑤ 断路器之后的电流互感器发出的电流与高压电路中的电流成正比,借助**互感器开关**供给**电流表**和**过电流继电器**。三相电源时要在两相安装电流互感器。

高压电动机
电灯用变压器
动力用变压器
高压提相电容器

⑥ 从电流互感器之后,高压电路又分送到**高压电动机**、**电灯用变压器**、**动力用变压器**等的负荷。变成适合各种负荷用途的使用电压。另外,为改善负荷电路的功率因数,也连接**高压提相电容器**。

高压受电设备的接线图

现在用电设备产业界绘制的高压受电设备图纸,主要是单线接线图。绘制图面是使用JIS(JIS C 0617-1999 系列1)所规定的图形符号,在JIS中没有的则使用日本配电盘协会(JSIA)的规定。高压受电设备电力流程的复线接线图示于图9.14。

6　业务用电气工作物的绝缘耐力试验

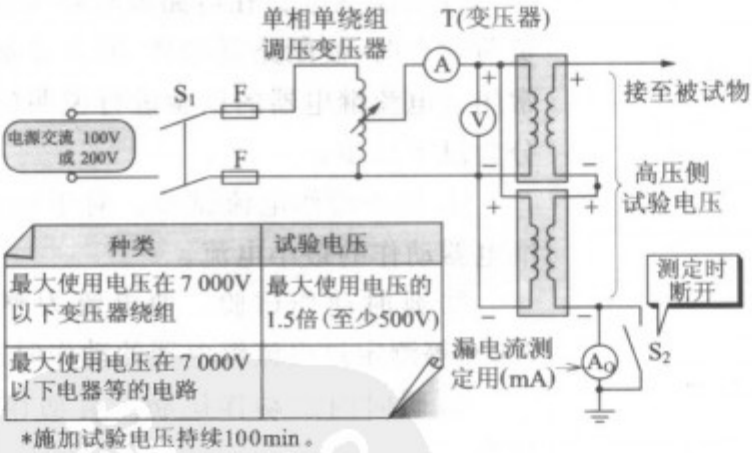
要　点

业务用电气工作物的电气施工完成时，在使用前先进行竣工检查。主要检查项目有测量绝缘电阻、测量接地电阻、绝缘耐力试验及保护继电器试验等。绝缘耐力试验及保护继电器试验尤其重要。

解　释

绝缘耐力试验的电路

这种试验主要对高压电路及高压机器设备进行绝缘性能的判定。试验电路可用耐压试验变压器及图 9.15 所示的两台单相变压器。



种类	试验电压
最大使用电压在 7 000V 以下变压器绕组	最大使用电压的 1.5倍(至少500V)
最大使用电压在 7 000V 以下电器等的电路	

*施加试验电压持续100min。

图 9.15　绝缘耐力试验(2 台单相变压器)

对地短路继电器的动作试验电路

对地短路继电器在电路或机器发生对地短路事故时，零相电流互感器 ZCT 可检测出零相电流，使断路器 CB 动作。在连动试验中有：①最小动作电流试验；②延时动作试验。示例于图 9.16。

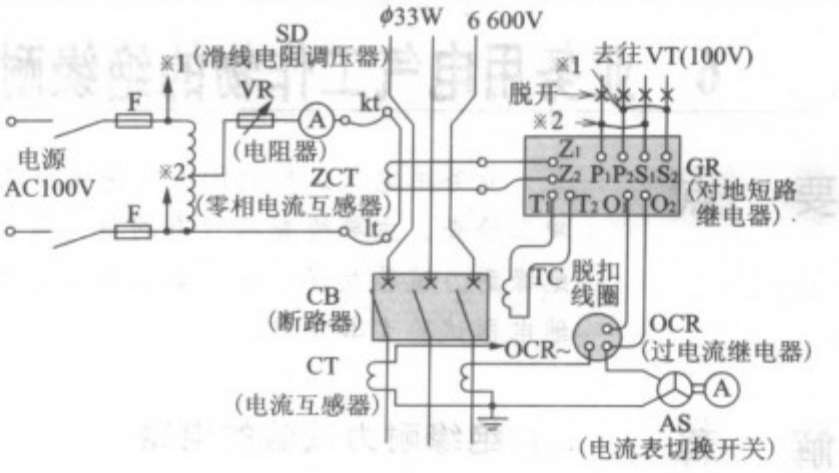


图 9.16　对地短路继电器的动作试验电路

过电流继电器的动作试验电路

过电流继电器在电路或机器发生对地短路事故时及过负荷状态时，使断路器动作，断开事故电路。这里就感应型常闭过电流继电器的试验进行说明(见图 9.17)。实验内容分为以下三步：

① 最小动作电流试验。对于电流整定值，测定过电流继电器动作的最小电流。

② 延时动作试验。使电流为整定值的 300%、500%、700%等测定过电流继电器的动作时间。

③ 瞬时因素动作试验。有动作电流试验和延时动作试验。

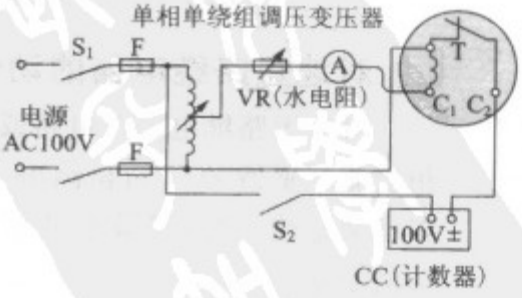


图 9.17　过电流继电器的动作试验电路

过电流继电器与断路器的连动试验电路

与断路器的连动试验也是用上述的过电流继电器，进行 3 种试验。示例于图 9.18。

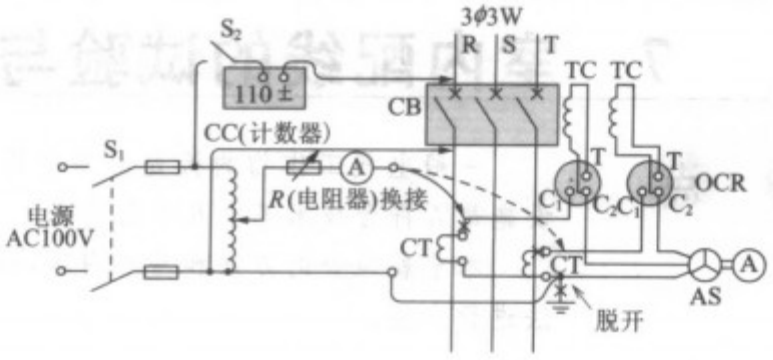


图 9.18 过电流继电器与断路器的连动试验电路

7　室内配线的试验与检查

要　点

一般电气工作物的检查内容就是电工技术人员施工的设施是否符合技术基准及有关法令。

本节就检查的方法和基准内容，以及测量仪表的使用方法进行介绍。

解　释

竣工检查的步骤

竣工检查也叫事前检查，大致分为检查与测量。检查的顺序如下：

设备检查　人用肉眼或手查看电气设备的整体。

绝缘电阻试验　用绝缘电阻表(兆欧表)测定。

接地电阻试验　用接地电阻表(接地表)测定。

导通试验　使用电路计等，试验接触情况或其与合同内容是否相符。

通电试验　实际流过电流，试验有无异常。

接地电阻的测定与基准

图 9.19 表示用接地电阻表的测定方法，表 9.22 是接地电阻的基准。

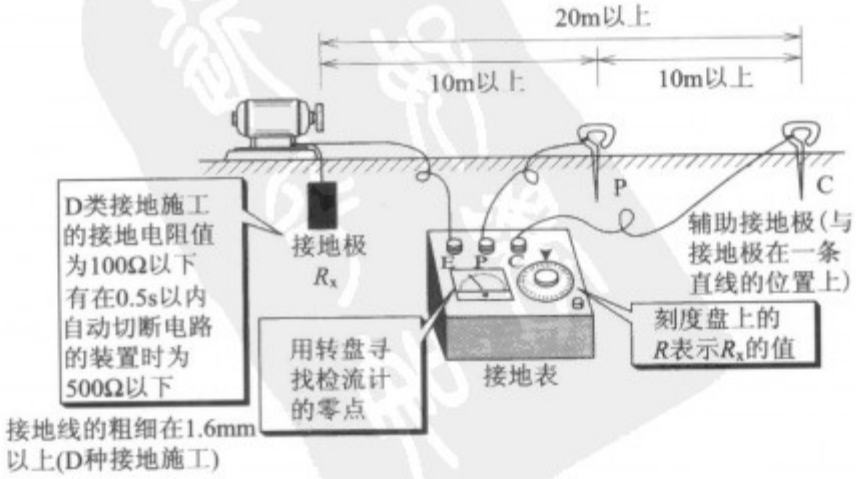


图 9.19　用接地电阻表测定

绝缘电阻的测定与基准

在600V以下的低压电路中，用开关或过电流断路器，其方法是随着每次通断电路，测量以下两种绝缘电阻：

① 电路与大地之间的绝缘电阻(对地绝缘电阻)(参见图9.20)。

表9.22 接地电阻的基准

种类	电阻值	接地线的粗细
A类接地施工	10Ω以下	直径2.6mm以上
B类接地施工	$\frac{150}{\text{单线接地电流}}$Ω以下（有例外）	直径4.0mm以上
C类接地施工	10Ω以下	直径1.6mm以上
D类接地施工	100Ω以下*	直径1.6mm以上

* 有在0.5s内自动切断电路的装置时为500Ω。

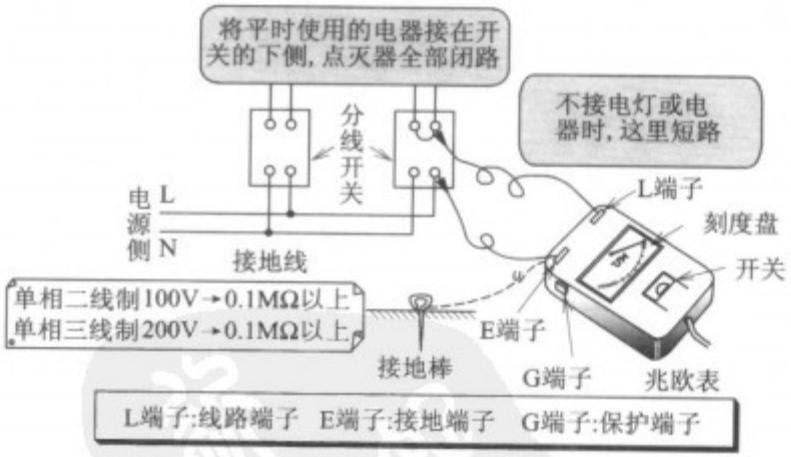


图9.20 对地绝缘电阻的测定

② 电线相互间绝缘电阻(线间绝缘电阻)(参见图9.21)。

此外，绝缘电阻值的基准依据《电技》，示于表9.23。

表9.23 低压绝缘电路的基准

电路使用电压的区分	绝缘电阻值
300V以下，对地电压150V以下	0.1MΩ以上
300V以下，对地电压超过150V	0.2MΩ以上
超过300V，在600V以下的场合	0.4MΩ以上

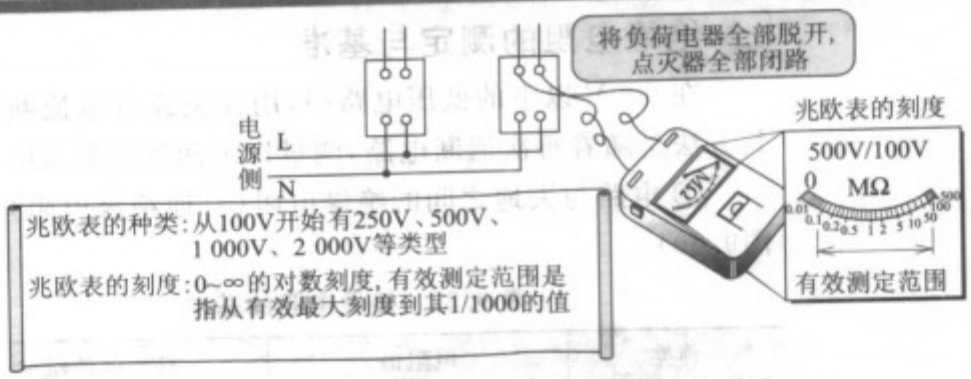
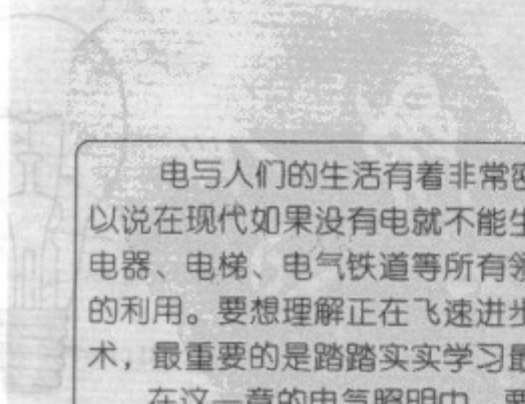


图 9.21　线间绝缘电阻的测定

第10章

电气技术应用

● 责任编委
冈本裕生
● 执　　笔
冈本裕生(1)
昆　秀行(2～7)
村田克彦(8～9，13～15)
原田勇人(10～12)



电与人们的生活有着非常密切的关系，可以说在现代如果没有电就不能生活。它在家用电器、电梯、电气铁道等所有领域都得到广泛的利用。要想理解正在飞速进步的电工电子技术，最重要的是踏踏实实学习最基本的知识。

在这一章的电气照明中，要学习照明基础及各种光源的特点和有关照明设计，在电热部分要深入理解各种加热方式的原理及构造。在电动力的应用方面要学习电气铁道的特点及磁悬浮式铁道的构成，还要学习随着机械电子学的发展，以及目前在机器人领域和工厂中的最尖端技术。

1　光　源

要　点

电灯的历史是从爱迪生发明最初的碳丝灯泡开始的，后来又有日光灯、HID 灯（高压放电灯），于是放电灯开始普及。最近从地球环境保护的角度出发，开始注意节能化，利用变换器与高频启动点灯专用型 Hf 日光灯组合已开始普及。现在有代表性的光源有白炽灯、日光灯、水银灯、卤化金属灯及钠灯等。根据光源的效率，光色及光的色调效果等不同，其用途各异。

解　释

由温度辐射产生光

温度辐射

物体在高温下发光称为**温度辐射**，有白炽灯和卤素灯。

白炽灯　灯泡内的灯丝流过电流时因高温而白热化，由于温度辐射而发光。为了抑制灯丝的蒸发，在灯泡内封入 10％的氮和 90％的惰性气体氩。白炽灯的特点是廉价而且光的色调效果好。图 10.1 表示白炽灯的构造。



图 10.1　白炽灯的构造

卤素灯　在白炽灯中除了充入惰性气体外，还加入微量的碘或溴等卤族元素，可以抑制灯丝的蒸发。这样做能使管壁不发黑，直到灯的寿命终止光通量不会发生变化。

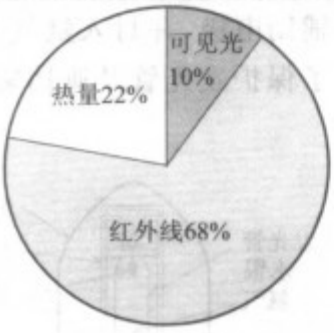


图 10.2 白炽灯的发光效率

由冷光发出的光

将电能直接变换成光发射叫做冷光，有日光灯及水银灯等。

日光灯 日光灯是应用在水银蒸气中的放电引起荧光物质的发光作用。图 10.3 表示日光灯的构造。在玻璃管的内壁涂有荧光物质，并有少量的水银。为了容易放电，还封入氩气。由于日光灯管中的水银蒸气发生弧光放电，热电子得以加速并碰撞水银原子而发出紫外线，照射在荧光物质上发出可见光。

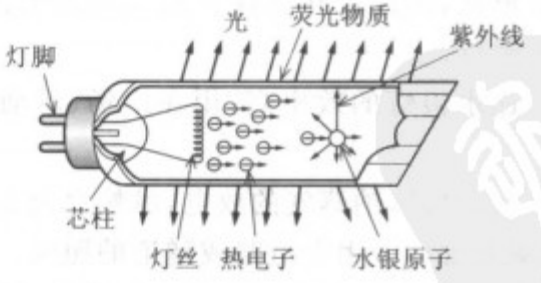


图 10.3 日光灯的构造

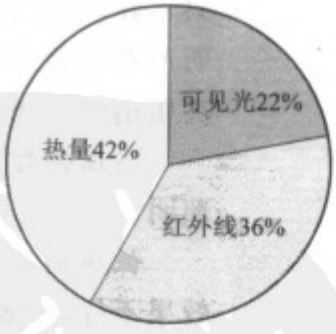


图 10.4 日光灯的发光效率

最近为了消除闪烁，提高发光效率，出现用变换器方式的高频启动点灯专用日光灯（Hf 日光灯），它是一种节能灯，用得非常多。

日光灯的寿命大约是白炽灯的 10 倍，光色一般有 5 种。特点是光通量随周围的温度而变化。

水银灯 利用在水银蒸气中的弧光放电来发光。图 10.5 表示高压水银灯的构造。在发光管中有两个主电极和

辅助电极，并封入氩气和水银等。在外管内封入氮气，是为了保护发光管及遮挡紫外线。

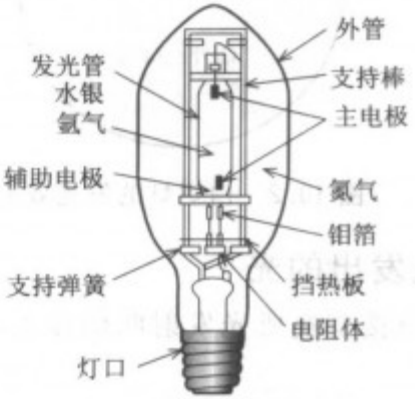


图 10.5　高压水银灯的构造

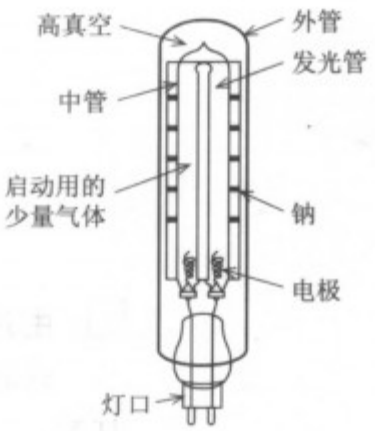


图 10.6　钠灯的构造

水银灯的亮度高而且寿命长，用在道路或工厂的照明等。但缺点是如果一旦灯灭，因水银的蒸气压力还高，要求开始放电的电压高，因此不能立刻再次启动。

钠灯　利用钠蒸气的弧光放电，构造与高压水银灯非常相似。管内封入钠、水银和氙气。效率高，寿命长，但色调效果不好，不适合一般照明。但黄色光的穿透力强，可以很鲜明地看出物体的形状，因此用在高速公路和道路的照明，有高压钠灯与低压钠灯。

高压钠灯　比水银灯的效率高，用在广场、运动场等处照明。

低压钠灯　利用低压钠蒸气的放电，虽然单色光的色调效果不好，但效率非常高。用于道路或隧道的照明。

卤化金属灯　在水银蒸气中封入金属卤素化合物（碘化钠、碘化铟等化合物）。比水银灯的效率高，特别是色调效果好，多用在工厂或体育设施等处。

氙灯　利用氙气体的放电，光色接近自然的白昼光色。可作为点光源用在放映机、投影仪等。也可以用作标准白色光源或广场照明场合等。

霓虹灯管与氖灯　图 10.7 是霓虹灯管的构造，原理是利用真空放电时产生的阳极光柱。由于光的颜色多，大量用

作霓虹灯广告牌。霓虹灯管发光的颜色因封入内部气体的种类，以及涂在管内部的荧光涂料的种类而异，可以发出许多种颜色的光。

氖灯是把霓虹灯管中电极的间隔做得很近，是利用阴极辉光的原理(见图 10.8)。因消耗电功率少，多用作夜明灯或指示灯、机器人及测电笔等。

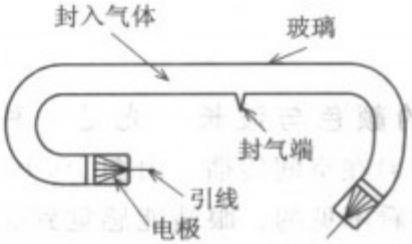


图 10.7 霓虹灯管的构造



图 10.8 氖灯的构造

相关知识

◆ 各种光源的灯效率

灯效率用灯的全光通量除以灯消耗电功率的数值表示。数值越大效率越高。灯效率因灯的种类、瓦特数、使用状况不同而异。

图 10.9 表示灯效率与灯种类的关系，高压钠灯的效率最高。在相同种类的灯里，瓦特数越大效率越高。另外，灯的可见光比例越高，灯的效率也越高。虽然灯效率的高、低是选择灯的一个标准，但有时也选择虽然效率低但色调效果好的灯或容易控制配光的灯。

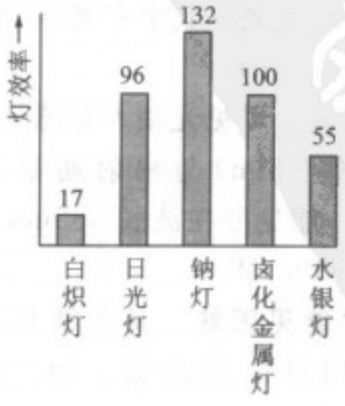


图 10.9 各种光源的灯效率

2　光的基础知识

要　点

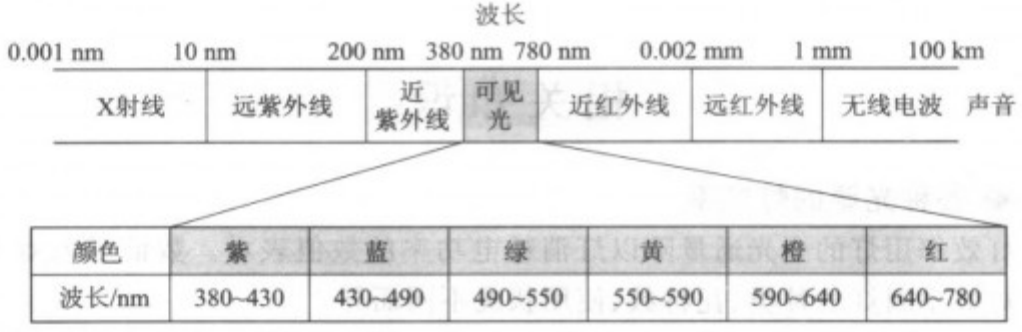
光是波长为 380～780nm 的电磁波。衡量光的物理量及单位有光通量 F(lm)、发光强度 I(cd)、照度 E(lx)、发光度 M(lm/m²)及亮度 L(cd/m²)等。

解　释

光

光的颜色与波长　光是一种电磁波，以光速(约 3×10^8m/s)在空间传播。由图 10.10 可看出大部分电磁波都是肉眼看不见的。眼睛能感觉到亮光部分波长的电磁波叫做**可见光**，是在 380～780nm 范围的电磁波。

可见光



颜色	紫	蓝	绿	黄	橙	红
波长/nm	380~430	430~490	490~550	550~590	590~640	640~780

图 10.10　电磁波的波谱

辐射通量　在单位时间内从光源发射的能量称为辐射通量 Φ，单位用瓦[特](W)。

光通量　在辐射通量中包含有人眼感觉不到的和人眼有光感的可见光。其中有光感的光的能量称为光通量 F，单位用流[明](lm)。

能见度　可见光使人眼感觉的明亮程度称为能见度。用光通量 F(lm)与辐射通量 Φ(W)之比表示，单位是(lm/W)。能见度在波长 555nm 处最大，称为**最大能见度**。其值为 683lm/W。

最大能见度

相对能见因数　其他波长的能见度与最大能见度之比称为相对能见因数。图 10.11 是相对能见因数的曲线。

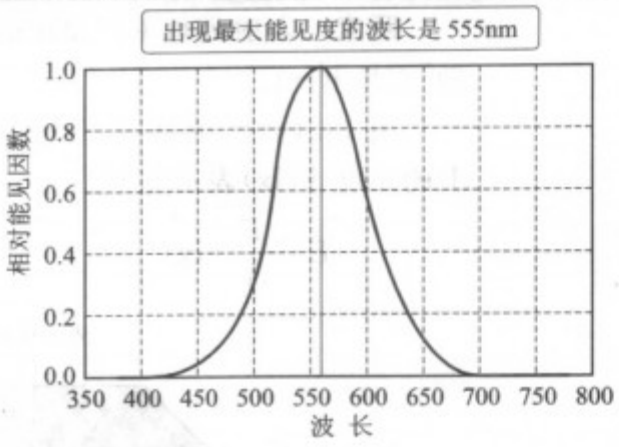


图 10.11 相对能见因数的曲线

照明用词汇与单位

立体角 在图 10.12 中，从 O 点看表示光向空间展开的角度称为立体角，单位用球面角度(sr)。

立体角 ω 用下式表示：

$$\omega=\frac{A}{r^2}\ (\mathrm{sr})$$

从 O 点开始，半径为 r (m)球的面积是 $4\pi r^2$ (m^2)，所以点的周围总立体角是 4π(sr)。

发光强度 某方向每单位立体角的光通量称为发光强度 I。单位是坎[德拉](cd)。如果光源是一个点，称为点光源。

图 10.13 表示从点光源向立体角 ω(sr)发出 F(lm)的光通量时，发光强度 I(cd)用下式表示：

$$I=\frac{F}{\omega}\ (\mathrm{cd})$$

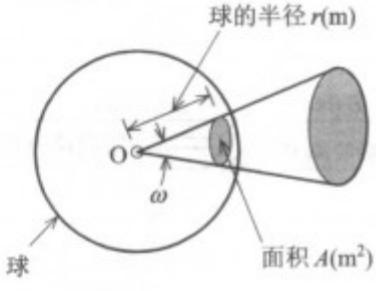


图 10.12 立体角

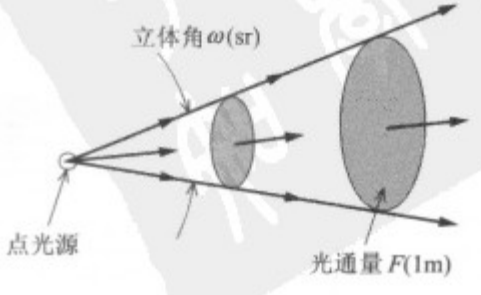


图 10.13 发光强度

照度　入射到每单位面积的光通量称为照度 E，单位是勒[克斯](lx)。

图 10.14 中，光通量 F(lm)入射到面积 A(m^2)，在此面上的照度 E(lx)表示如下：

$$E=\frac{F}{A}\ (\mathrm{lx})$$

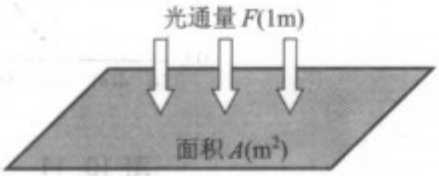


图 10.14　照　度

流[明]每平方米

发光度　与照度相反，从某个面的单位面积发散的光通量称为发光度 M，单位是用**流[明]每平方米**(lm/ m^2)表示。

假设从某面发散的光通量是 F(lm)，面积为 A(m^2)，则发光度 M(lm/m^2)用下式表示：

$$M=\frac{F}{A}\ (\mathrm{lm/m^2})$$

全扩散面

不论从任何方向看，亮度也都相同的表面称为**全扩散面**。在全扩散面上的发光度 M(lm/m^2)与亮度的关系如下式：

反射率

$$M=\pi L\ (\mathrm{lm/m^2})$$

在图 10.15 中，反射光通量与入射光通量之比称为**反射率**。假设面的照度为 E(lx)，面的反射率是 ρ，则反射面的发

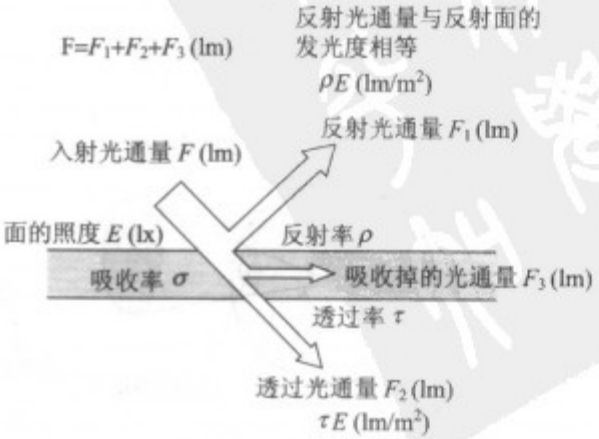


图 10.15　反射面与透过面的发光度

光度 M_ρ(lm/m²)用下式表示：

$$M_\rho = \rho E(\mathrm{lm/m^2})$$

透过率

透过光通量与入射光通量之比称为**透过率**。假设面的透过率是 τ，透过面的发光度 M_τ(lm/m²)用下式表示：

$$M_\tau = \tau E(\mathrm{lm/m^2})$$

吸收率

吸收掉的能量与入射能量之比称为**吸收率**。被吸收的能量在材料中转变成热能等的能量。在反射率 ρ、透过率 τ、吸收率 σ 之间有以下关系式：

$$\rho + \tau + \sigma = 1$$

亮度 从某个方向看物体或光源的明亮程度称为亮度。一般是表示发光(反射、透过)面的明亮程度，亮度太高看上去就感到眩目。亮度的符号是 L，单位用**坎[德拉]每平方米**(cd/m²)。

坎[德拉]每平方米

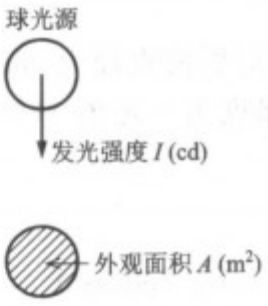


图 10.16 亮 度

图 10.16 所表示的球光源，不论在什么方向都有 I(cd)的发光强度。对着光源看它的外观面积(面对光源的正投影)时，亮度就是每单位面积 A(m²)的发光强度，用下式表示：

$$L = \frac{I}{A}\ (\mathrm{cd/m^2})$$

光通量、发光强度、照度、发光度、亮度的关系示于图 10.17。

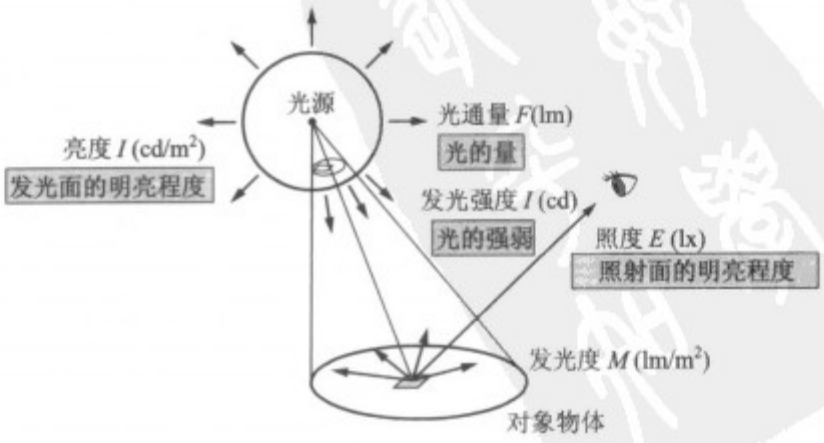


图 10.17 光通量、发光强度、照度、发光度、亮度的关系

例　题

[1] 从点光源以立体角 0.125sr，发射 150lm 的光通量，求此时的发光强度。

答　发光强度 $I=\dfrac{F}{\omega}=\dfrac{150}{0.125}=1200$（cd）

[2] 某光源的平均球面发光强度为 200cd。求此光源的总光通量 F(lm)。

答　球面光源的立体角 $\omega=4\pi$(sr)

总光通量 $F=\omega I=4\pi\times200=4\times3.14\times200=2\ 512$（lm）

[3] 用照度为 180lx 的光照射透过率是 60%的完全扩散性半透明板。求出从背面看的亮度 L(cd/m^2)。

答　面的透过率 $\tau=0.6$，透过面的发光度 M_t(lm/m^2)是

$$M_t=\tau E=0.6\times180=108\ (\text{lm/m}^2)$$

根据 $M=\pi L$(lm/m^2)，所以从背面看的亮度 L(cd/m^2)是

$$L=\frac{M_t}{\pi}=\frac{108}{3.14}=34.4\ (\text{cd/m}^2)$$

[4] 有一完全扩散性的直管形日光灯，灯管的直径为 38mm，管的发光部分长度 600mm，与管的中心轴垂直的发光强度为一定值 114cd。求此日光灯的亮度。

答　此日光灯的亮度是

$$L=\frac{I}{A}=\frac{114}{38\times10^{3}\times600\times10^{3}}=5\ 000\ (\text{cd/m}^2)$$

3　点光源产生的照度

要　点

由点光源产生的法线照度 E_n 与点光源距离的平方成反比。这称为距离平方反比定律。

当入射角为 θ 时，水平面的照度是法线照度 E_n 的 $\cos\theta$ 倍。这称为入射角余弦定律。

解　释

距离平方反比定律

在图 10.18(a)中，离开点光源的距离为 2 倍时面积变成 4 倍。在图 10.18(b)中，假设点光源的发光强度是 I(cd)，因总光通量 F(lm)是 $4\pi I$(lm)，球的表面积 A 是 $4\pi l^2$(m^2)，所以在距离点光源 l(m)处的照度 E(lx)可用下式表示：

$$E=\frac{F}{A}=\frac{4\pi I}{4\pi l^2}=\frac{I}{l^2}\ (\mathrm{lx})$$

距离平方反比定律

照度 E(lx)与光源距离的平方成反比，称为**距离平方反比定律**。

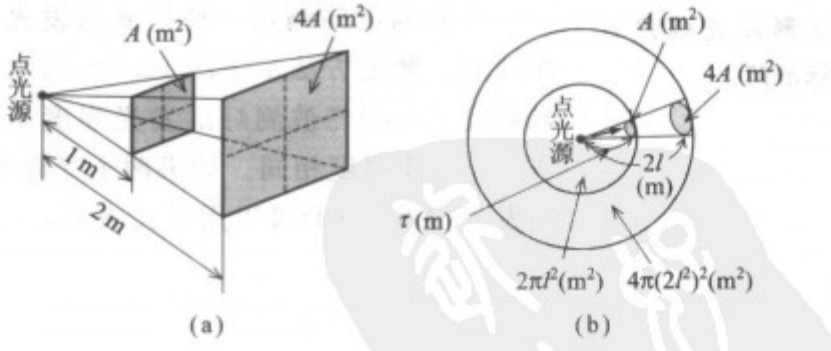


图 10.18　距离的平方反比律

法线照度，水平面照度，垂直面照度

在图 10.19 中，从点光源 L 以发光强度为 I(cd)照射到点 P，在点 P 的各个方向照度不同。

法线照度　与入射光线垂直面上的照度称为法线照度 E_n(lx)。假设入射角是 θ，从光源到该点距离是 l(m)，光源的高度是 h(m)，水平距离是 d(m)，则法线照度可用下式表示：

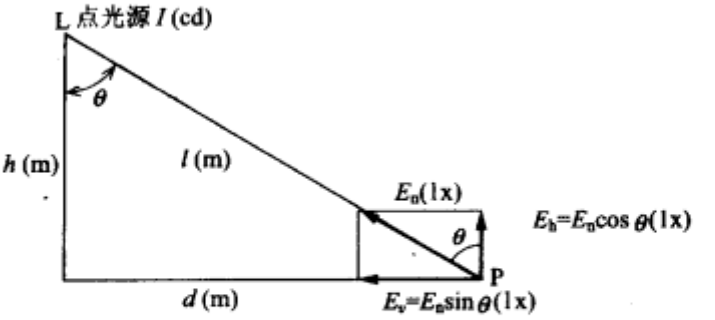


图 10.19　点光源在 P 点的照度

$$E_n=\frac{I}{l^2}\ (\mathrm{lx})$$

水平面照度　在 P 点，把对于水平面的照度称为水平面照度 E_h(lx)。水平面照度可以用下式表示：

$$E_h=E_n\cos\theta\ (\mathrm{lx})$$

垂直面照度　在 P 点，把对于垂直面的照度称为垂直面照度 E_v(lx)。垂直面照度可以用下式表示：

$$E_v=E_n\sin\theta\ (\mathrm{lx})$$

光的测定

长形发光强度计
标准灯

发光强度的测定　使用**长形发光强度计**测定光源的发光强度。测定方法示于图 10.20，用测光器比较**标准灯**的发光强度 I_s(cd)与被测灯的发光强度 I(cd)，调节距离 l_s(m)或 l(m)，使照度相同。如果两个光源的照度不相等，被测灯的发光强度 I(cd)可以用下式表示：

$$I=I_s\left(\frac{l}{l_s}\right)^2\ (\mathrm{cd})$$

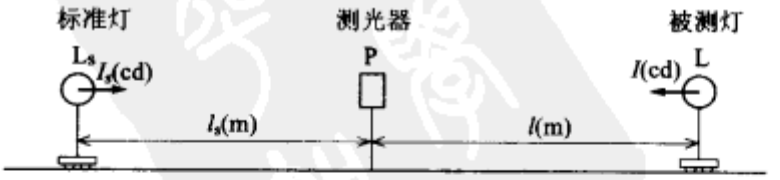


图 10.20　长形发光强度计

光通量的测定

测定光通量使用光通量计(球形光通量计)。测定的方

法如图 10.21 所示，将被测灯放在光通量计的球形灯罩中。调整距离 l(m)使窗口的亮度 L(cd/m²)在 P 点产生的照度与比较灯的亮度 L_c(cd/m²)(I_c(cd))产生的照度相等。

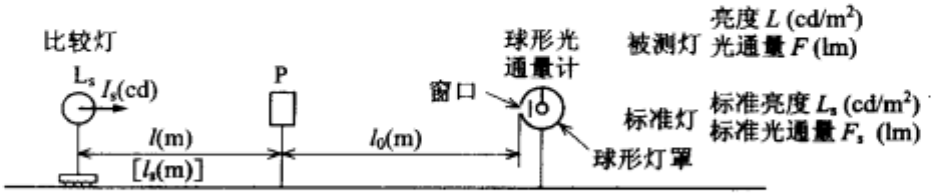


图 10.21 球形光通量计

其次，把标准灯(总光通量是 F_s(lm))换装在灯罩中，与上述相同，调整 l_s(m)使窗口的亮度 L_s(cd/m²)在 P 点产生的照度与比较灯 I_c(cd)产生的照度相等。根据以上的测定，被测灯的光通量 F (lm)可以用下式表示：

$$F=\left(\frac{l_s}{l}\right)^2 F_s \text{ (lm)}$$

配光曲线

配光

配光曲线

从光源向各个方向的发光强度分布情况称为**配光**。以光源为原点表示发光强度分布的曲线称为**配光曲线**。图 10.22 所示的配光曲线有表示通过光源中心的水平面上发光强度分布的**水平配光曲线**及表示垂直面上发光强度分布的**垂直配光曲线**。

水平配光曲线

垂直配光曲线

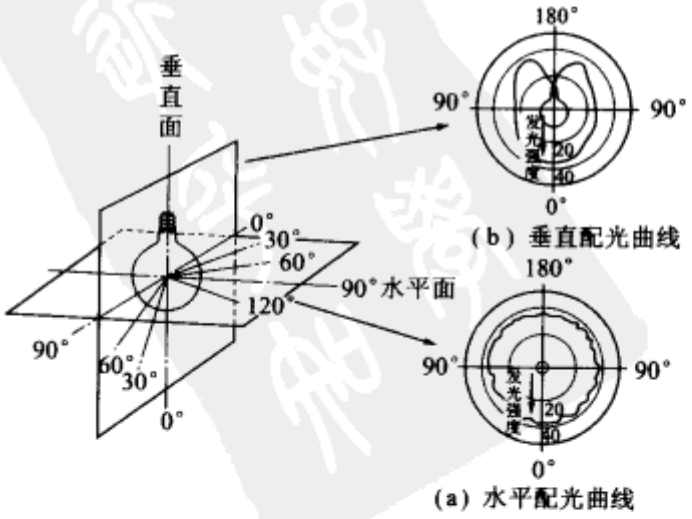


图 10.22 配光曲线的表示方法

例 题

[1] 图 10.23 是光源 A、B 的配置。在 P 点由于光源 A 产生的法线照度是 100 lx，光源 B 产生的法线照度是 80 lx。求两光源在点 P 产生的水平照度 E_h(lx)。

答 由于 AP、BP 的长度相等，所以

$$AP=BP=\sqrt{3^2+4^2}=5\ (m)$$

假设光源 A 在点 P 产生的水平面照度是 E_{Ah}；光源 B 在点 P 产生的水平面照度是 E_{Bh}，两光源在点 P 形成的水平面照度 E_h(lx)是：

$$E_h=E_{Ah}+E_{Bh}=100\times\frac{3}{5}+80\times\frac{3}{5}=108\ (lx)$$

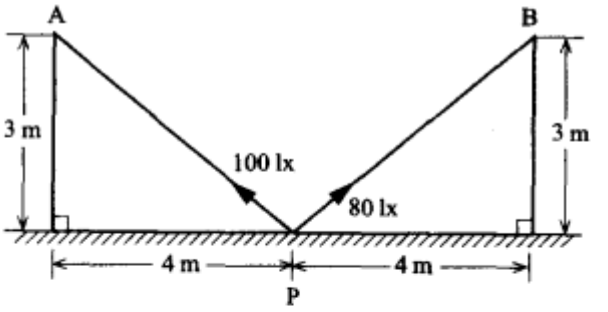


图 10.23

4 照明设计

要 点

在照明设计中必须考虑明视性(作业的照明)、舒适性(环境的照明)、经济性(节能)。

照明方式有全体照明、局部照明、局部的全体照明。另外,在利用照明器具配光的照明方式中,有直接照明、半直接照明、全体扩散照明、半间接照明及间接照明等。

全体照明的平均照度用光通量法计算。

作业面的光通量=入射到作业面的光通量($EA=NFMU$)

解 释

照明的基础

明视的条件 能很清楚地看见物体称为明视。明视的5个条件如下:

① 亮度。要有适当的照度,而且不眩目。

② 颜色。有助于对物体的明视及吸引视线。

③ 对比。物体的亮度与附近亮度之比要适当。

④ 大小。视角要大。

⑤ 时间。能有充分的时间观看。

眩目 如果在视野内有亮度高的光会使人感到不舒服或刺眼。这种现象称为眩目。在眩目中有使人感到不舒服的不快眩目,看东西困难的减能眩目,在接近视线方向的直接眩目,从所观看对象物反射的反射眩目。

节能的对策 在节能的对策中要考虑以下几点:

① 使用高效率的灯。

② 使用省电型的照明器具。

③ 灵活应用太阳光(自然光)。

④ 随手关灯,用自动点灭器或定时开关。日光灯采用200V的配线。

⑤ 按计划及时进行更换灯泡,清扫照明器具等维护工作。

照明方式与配光的分类

全体照明　为了使室内整体同样明亮，将多个照明灯具均匀配置在屋顶的照明方式。

局部照明　仅对需要照明的作业面等小范围照明的方式。

局部的全体照明　图 10.24 表示全体照明与局部照明并用的照明方式。室内全体是有限度的照明，而使作业的场所局部明亮起来。

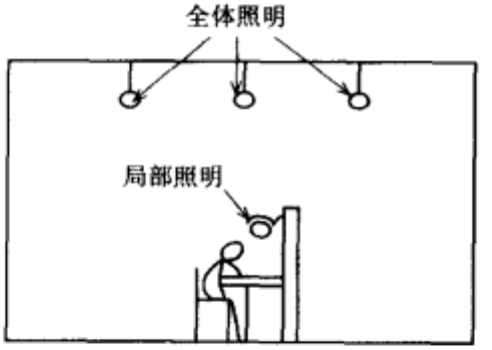


图 10.24　局部照明及全体照明

建筑化照明　图 10.25 表示将照明器具隐藏在屋顶或墙壁等处，使照明器具与建筑一体化的方式。

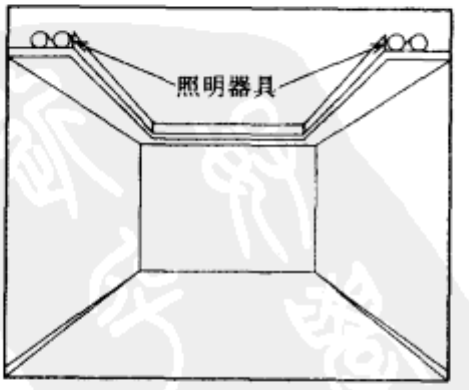


图 10.25　建筑化照明

利用照明器具配光的照明方式　图 10.26 表示利用照明器具配光的照明方式，按照不同目的选用相应的照明器具。

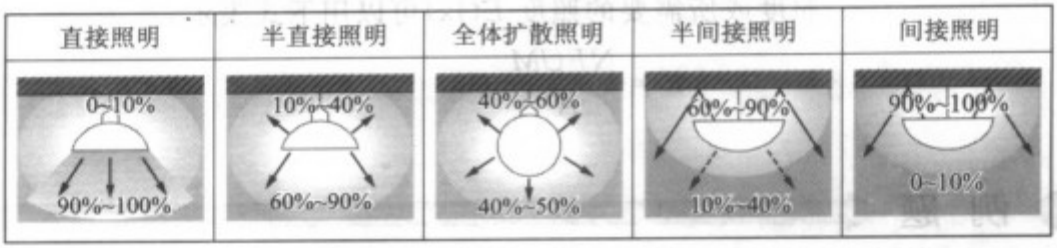


图 10.26 利用照明器具配光的照明方式

照明率及折旧率

照明率

照明率 从光源发出的光通量中，能达到作业面的光通量的比例称为**照明率** U。照明率用下式表示：

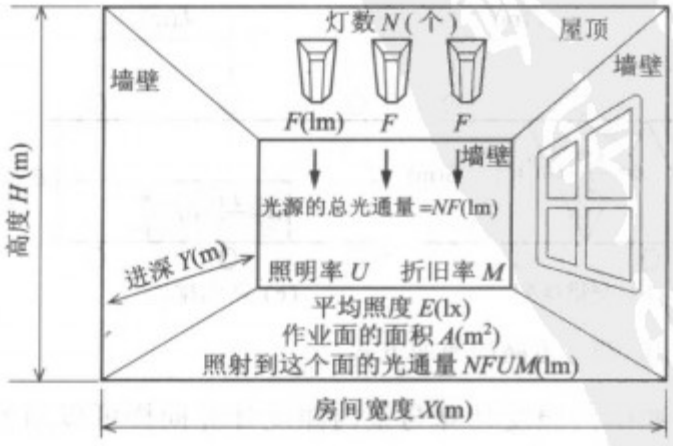
$$U=\frac{\text{到达作业面的光通量}}{\text{从光源发出的光通量}}$$

照明率以室指数和室内的反射率为依据，可以从制造厂的照明率表查到。一般小于 1。

折旧率 照明设备经过一段使用时间后，由于光源本身光通量的衰减，灯和灯具的污染等使照度降低。预先设想这些状况的修正系数称为折旧率 M。在进行照明设计时应加上折旧率，要考虑采用比必要照度高的值。

室内照明的照度计算

室内全体照明的平均照度用光通量法计算。假设图 10.27 中每一盏灯的光通量是 F（lm），作业面的面积是 A（m^2），灯数是 N（个），照明率 U，折旧率 M。则平均水平



地面或屋顶面积对墙壁面积之比称为室指数。设房间宽度是 X(m)，进深是 Y(m)。从光源到作业面的高度是 H(m)，室指数可以用下式表示：

$$R_i=\frac{XY}{(X+Y)H}$$

图 10.27 室内照明的照度计算

照度或所需要的照度 E(lx)可以用下式表示：

$$E=\frac{NFUM}{A}\ (\mathrm{lx})$$

例　题

[1] 有房间宽度是 15m，进深为 12m 的教室。在屋顶安装 40W 日光灯的双灯灯具 30 套，地面的平均照度是多少？设每一根日光灯管的光通量是 2 400lm，照明率 0.5，折旧率 0.7。

答　地面积 A ($\mathrm{m^2}$)，$A=XY=15\times12=180$ ($\mathrm{m^2}$)，照明率 0.5，折旧率 0.7。因此总光通量 $NF=30\times2\times2\ 400=144\ 000$(lm)，故地面的平均照度为

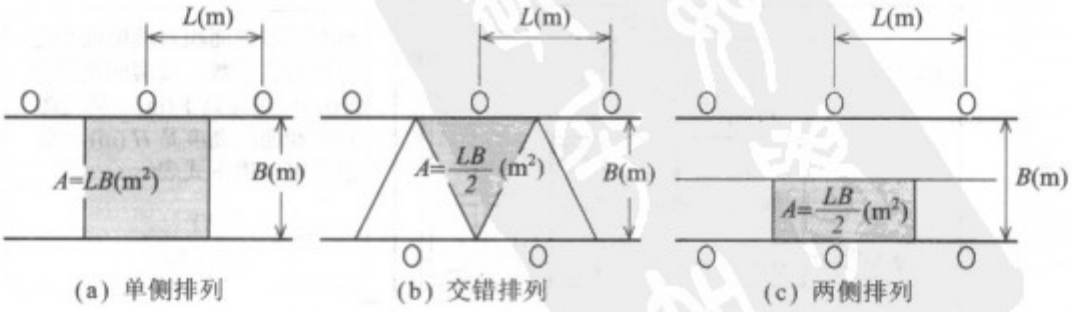
$$E=\frac{NFUM}{A}=\frac{144\ 000\times0.5\times0.7}{180}=280\ (\mathrm{lx})$$

道路照明的照度计算

道路照明的目的是为了在夜间或在隧道内等状况下的交通安全、畅通，确保能够识别道路状况、交通状况的视觉环境。

道路照明使用的光源种类有荧光水银灯(白色)、高压钠灯(橙白色)、低压钠灯(橙黄色)、日光灯(白色)等。

道路照明要沿着道路配置灯具。图 10.28 表示有单侧排列、交错排列、两侧排列。单侧排列用在市区较窄的街道，交错排列用在一般道路，两侧排列适用于宽阔的道路。



(a) 单侧排列　(b) 交错排列　(c) 两侧排列

图 10.28　道路的照明方式

道路照明的照度计算与室内照度计算同样可以用光通量法表示。

假设每一盏灯的光通量是 F(lm)，照明率 U，折旧率

M,被照明面积是A (m^2)。平均照度E(lx)可以用下式表示：

$$E=\frac{FUM}{A}\ (\mathrm{lx})$$

5　电加热

要　点

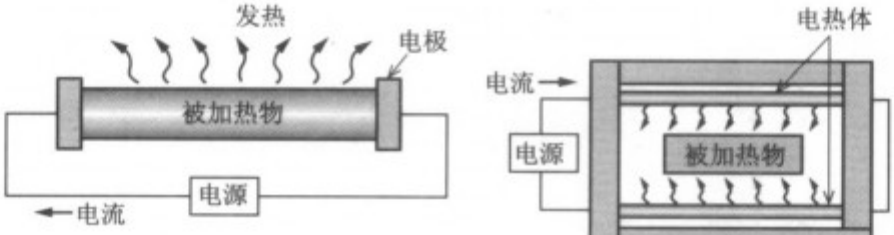
电加热就是将电力变换成热能的加热方式。在电加热方式中有电阻加热、电弧加热、感应加热、电介质加热、微波加热及红外线加热等。

解　释

电阻加热

电阻加热
直接电阻加热
间接电阻加热

利用在导体中流过电流时发生焦耳热的加热方式称为**电阻加热**。图 10.29 表示有使被加热物直接流过电流加热的**直接电阻加热**，与利用发热体加热被加热物的**间接电阻加热**。



(a) 直接电阻加热　　(b) 间接电阻加热

图 10.29　电阻加热

电弧加热

电弧加热
直接电弧加热
间接电弧加热

利用放电时的电弧热来加热称为**电弧加热**。图 10.30 表示有使电极与被加热物之间直接发生电弧的**直接电弧加热**，与利用电极之间发生电弧热的**间接电弧加热**。



(a) 直接电弧加热　　(b) 间接电弧加热

图 10.30　电弧加热

感应加热

感应加热

图 10.31 是在加热线圈中放入有导电性的被加热物并通以电流，于是在被加热物中发生涡流电流，这种利用焦耳热的加热方式叫做**感应加热**。用此方法加热绝缘体时，可将被加热物放入导电性的容器内，使热量传递到被加热物。

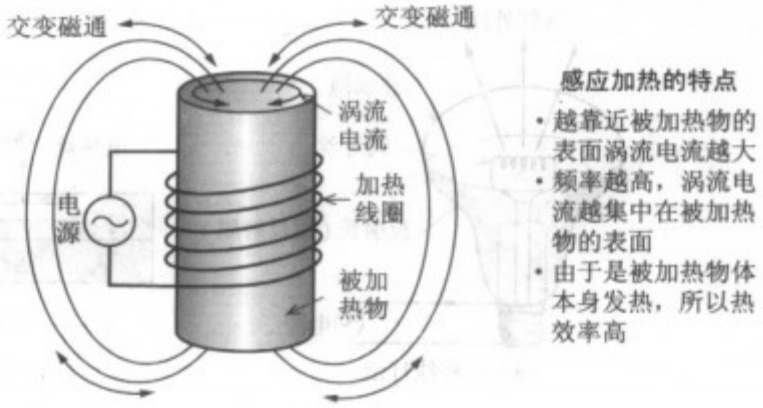


图 10.31 感应加热

电介质加热

电介质加热
高频加热
微波加热

在图 10.32 中的电极之间加以高频电压，因构成电介质的各个分子发生旋转、振动、碰撞、摩擦等激烈的运动，在电介质的内部发热。这种利用电介质本身发热的加热方式称为**电介质加热**。

所加电压的频率在 1～300MHz 范围称为**高频加热**，频率为 300MHz～30GHz 的加热方式称为**微波加热**。

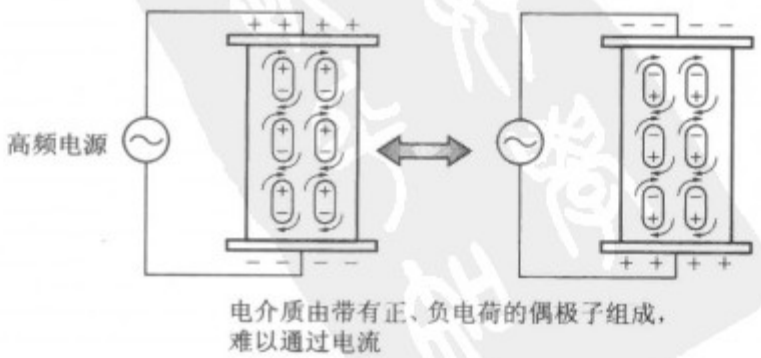


图 10.32 电介质加热

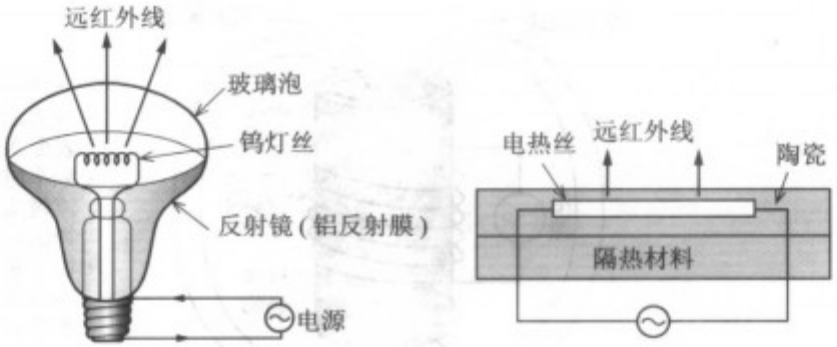
红外线加热

红外线加热

红外线灯泡

远红外加热器

利用红外线的辐射加热称为**红外线加热**。图 10.33 表示在红外线的放射源中有利用高温灯丝发射红外线的**红外线灯泡**，以及利用镍铬电热丝发热，由构成加热器的陶瓷发射远红外线的**远红外加热器**。



(a) 红外线灯泡　　(b) 远红外加热器

图 10.33　红外线加热

6 电热的计算

要 点

热传播的方式有传导、对流、辐射3种。热回路中的热流、温度差、热阻与电路中的电流、电位差、电阻的关系相同，因此欧姆定律在热回路中也成立。

解 释

电热的产生

电阻加热

在电阻中流过电流就产生焦耳热。利用这种焦耳热加热的方法称为**电阻加热**。

图10.34表示在电阻 $R(\Omega)$ 上加电压 $V(\mathrm{V})$，流过的电流是 $I(\mathrm{A})$，消耗的功率为 $P(\mathrm{W})$ 时，在 t 内发生的热量 $Q(\mathrm{J})$ 可以用下式表示：

$$Q=I^2Rt=Pt\ (\mathrm{J})$$

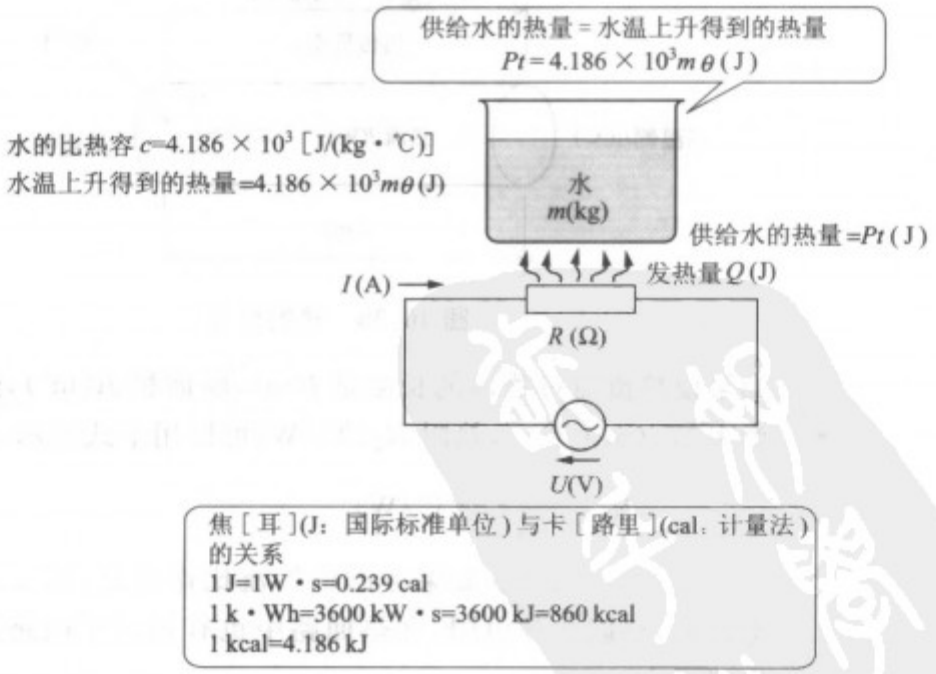


图10.34 发生热量

温度上升

热容量

要使物体的温度上升1℃(1K)所必需的热量称为**热容量** $C(\mathrm{J/℃})$。使物体温度上升 $\theta(℃)$ 需要的热量以下式

表示：

$$Q=C\theta \quad (\mathrm{J})$$

当物体的质量为 m(kg)，比热容为 c[J/(kg·℃)]时，热量可以用下式表示：

$$Q=cm\theta \quad (\mathrm{J})$$

热的传播方式

热传导

传导　热量从物体的高温侧向低温侧传播的现象称为热传导。单位时间内流过的热量称为热流。

在图 10.35 中高温是 t_1(℃)，低温是 t_2(℃)，物体的温度差是 $\theta=t_1-t_2$(℃)，热阻是 R_t(℃/W)。从高温向低温的热流 I(W)以下式表示：

$$I=\frac{t_1-t_2}{R_T}=\frac{\theta}{R_T} \quad (\mathrm{W})$$

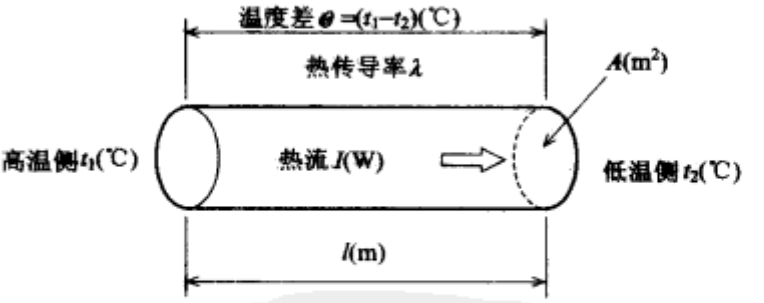


图 10.35　热的传导

如果设热流流过物体的长度是 l(m)，断面积 A(m²)，热传导率 λ[W/(m·℃)]，热阻 R_T(℃/W)可以用下式表示：

$$R_T=\frac{l}{\lambda A} \quad (℃/\mathrm{W})$$

表 10.1 意味着如果考虑把热流比作电流，温度差比作电位差，热阻比作电阻，在热回路中也有相当于电路的欧姆定律成立。

辐射　由于热能使物体中有热振动，所以热能以电磁波的形式发射的现象称为辐射。

图 10.36 表示将面积为 A_1(m²)的高温物体与面积为 A_2(m²)的低温物体对面放置，从面上互相辐射能量。热流 I(W)是由 T_1(K)产生的辐射能与 T_2(K)产生的辐射能之

差，即用下式表示：

$$I=A_1F_{12}\sigma(T_1^4-T_2^4)=A_2F_{21}\sigma(F_1^4-F_2^4)$$

斯蒂芬·玻尔兹曼常数

形态系数

式中，σ 叫做**斯蒂芬·玻尔兹曼常数**，其值为 $5.67\times10^{-8}\,\mathrm{W/(m^2\cdot K^4)}$。$F_{12}$、$F_{21}$ 是由两个辐射面的大小、物体的形状以及相对位置等几何形状决定的值，称为**形态系数**。

表 10.1 热回路与电路

热回路的量	电路的物理量
温度差 θ(K)	电压 V(V)
热量 Q(J)	电量 Q(C)
热流 I(W)	电流 I(A)
热传导率 λ[W/(m·K)]	电导率 σ(S/m)
热阻 R_T(K/W)	电阻 R(Ω)
热容量 C(J/K)	电容量 C(F)

K 也可以用℃替代。热传导系数也可以称为热传导率或表面电热率。

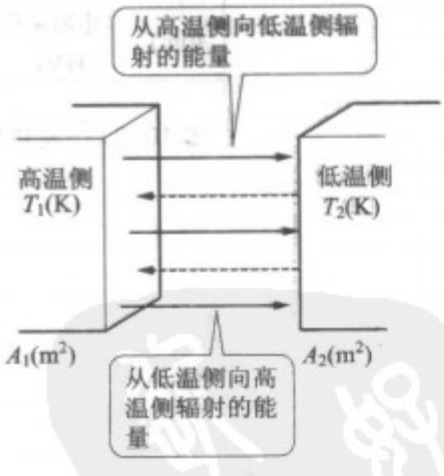


图 10.36 辐射引起的热流

对流 将空气或水从下面加热时，热量从下面传导到上面，因此可以被加热。但如果下面和上面的温度差达到一定时就发生被加热的空气或水因变轻而上升，以及温度低的空气或水流向下方的现象。这种因被加热的空气或水移动而使热得以传播的现象称为**对流**。

对流

表面功率密度

图 10.37 表示在电阻 R(Ω)的发热体上加电压 V(V)，有电流 I(A)流过。加热功率 P(W)可以用下式表示：

$$P=\frac{V^2}{R}=I^2R\ (\mathrm{W})$$

发热体直径为 d(m)，断面积是 A(m²)，长度是 l(m)，电阻率是 ρ(Ω·m)时，电阻 R(Ω)用下式表示：

$$R=\rho\frac{l}{A}=\rho\frac{l}{\pi d^2/4}=\frac{4\rho l}{\pi d^2}\ (\Omega)$$

在发热体上消耗的电功率变成热量，从发热体的表面散发出来。此时在发热体表面每单位面积消耗的电功率(W)称为**表面功率密度** W_d(W/ m²)。用下式表示：

表面功率密度

$$W_d=\frac{P}{A}=\frac{I^2R}{\pi dl}=\frac{4\rho I^2}{\pi^2 d^3}\ (\mathrm{W/m^2})$$

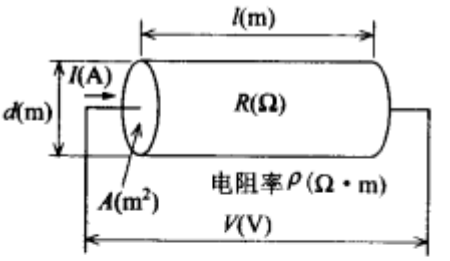


图 10.37　发热体

7 电炉与电焊

要 点

按照加热方式，电炉可以分为电阻炉、电弧炉、感应炉。电焊分为利用焦耳热的电阻焊与利用电弧热的电弧焊。

解 释

电阻炉

直接式电阻炉
间接式电阻炉
石墨化炉

电阻炉是利用焦耳热的电炉。在电阻炉中有在导电性的被加热物流过电流而加热的**直接式电阻炉**，以及在炉内的发热体上流过电流，使被加热物间接加热的**间接式电阻炉**。

图 10.38 所示的**石墨化炉**是制造人造石墨电极的直接式电阻炉。使碳粉及被加热物的表面渗碳体（人造石墨电极）通过电流发热。炉内达到 3000℃左右的高温，表面渗碳体即可石墨化。

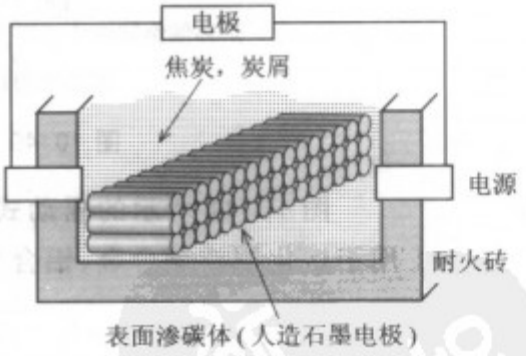


图 10.38 石墨炉

盐浴炉

图 10.39 所示的**盐浴炉**是间接式电阻炉。炉中加入熔融的氯化钠等盐类，从电极通以电流使被加热物间接地被加热。

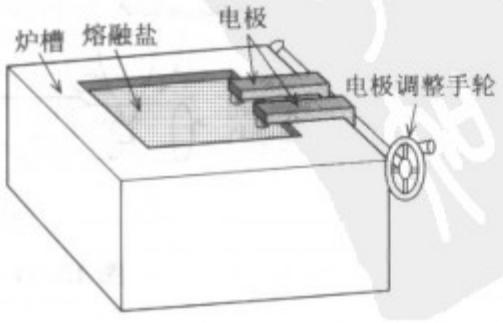


图 10.39 盐浴炉

电弧炉

直接式电弧炉
间接式电弧炉

电弧炉是利用电弧热的电炉。电弧炉有使电极与被加热物之间发生电弧的**直接式电弧炉**，以及使相对的电极之间发生电弧而间接加热被加热物的**间接式电弧炉**。

图 10.40 所示的电弧炼钢炉就是直接式电弧炉，是使石墨电极与废钢铁之间直接发生电弧，电弧热使废钢铁熔化，得到钢水。

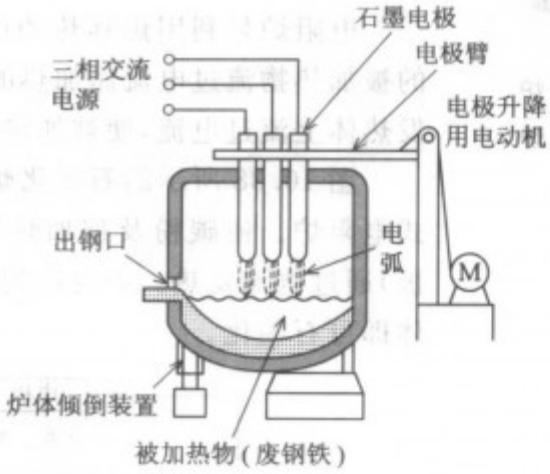


图 10.40　电弧炼钢炉

摇动式电弧炉

图 10.41 所示的**摇动式电弧炉**是间接式电弧炉，主要用于熔化铜或铜合金、铝合金等。

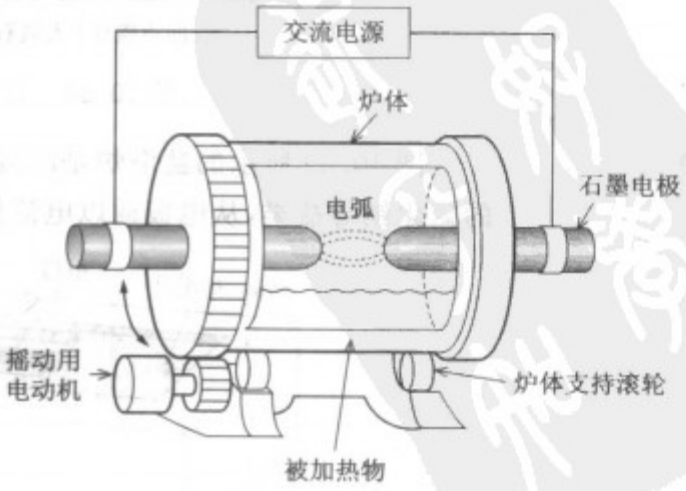


图 10.41　摇动式电弧炉

感应炉

感应炉是使具有导电性的被加热物发生涡流电流，利用涡流电流产生的焦耳热来加热的电炉。感应炉有使用商用电源(50Hz，60Hz)的**低频感应炉**及用高频电源(1～10kHz)的**高频感应炉**。

低频感应炉
高频感应炉

图 10.42 是沟型低频感应炉，图 10.43 是坩埚型高频感应炉。

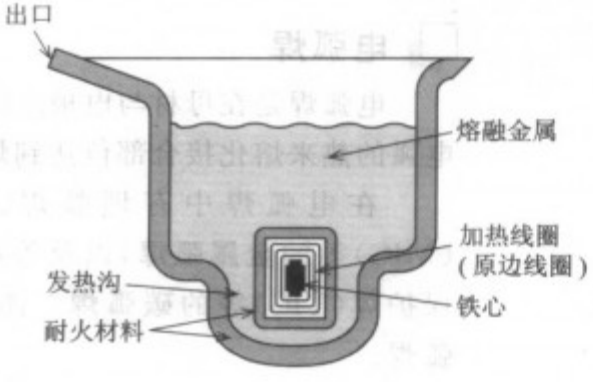


图 10.42 沟型低频感应炉

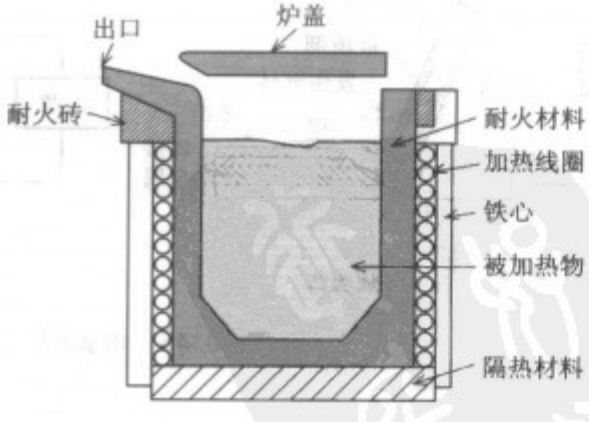


图 10.43 坩埚型高频感应炉

电阻焊

电阻焊
搭接焊
对接焊　点焊
缝(滚)焊　凸焊
对头焊　闪光焊

电阻焊是使焊接母材的接触部分流过大电流，用接触电阻产生的焦耳热来加热金属，然后加以机械压力焊接。

电阻焊分为**搭接焊**与**对接焊**。搭接焊有**点焊**、**缝(滚)焊**、**凸焊**等；对接焊有**对头焊**、**闪光焊**等。图 10.44 表示了搭接焊与对接焊。

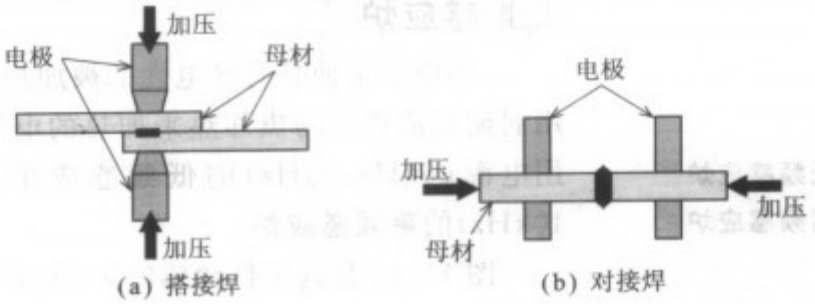


图 10.44　电阻焊

电弧焊

电弧焊是在母材与电极之间加电压使其发生电弧，利用电弧的热来熔化接合部位达到焊接的目的。

在电弧焊中有埋弧焊、金属极惰性气体保护焊(MIG)等的**金属弧焊**，以及等离子弧焊、钨电极惰性气体保护焊(TIG)等的**碳弧焊**。图 10.45 表示金属弧焊与炭弧焊。

金属弧焊
碳弧焊

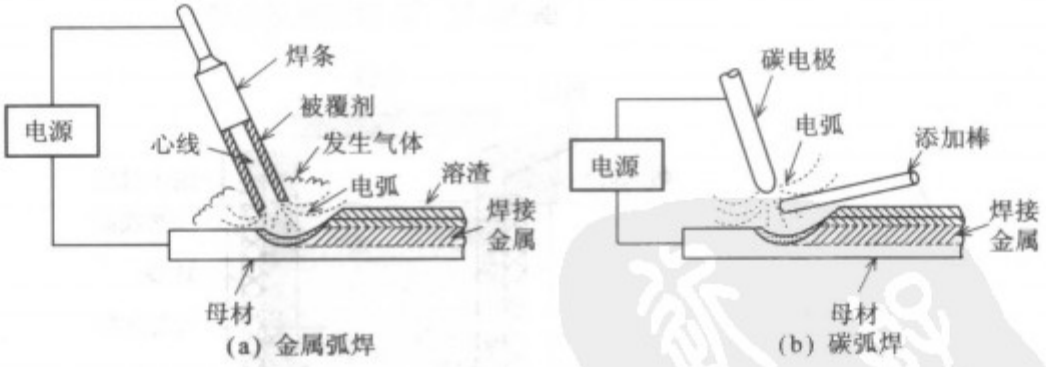


图 10.45　电弧焊

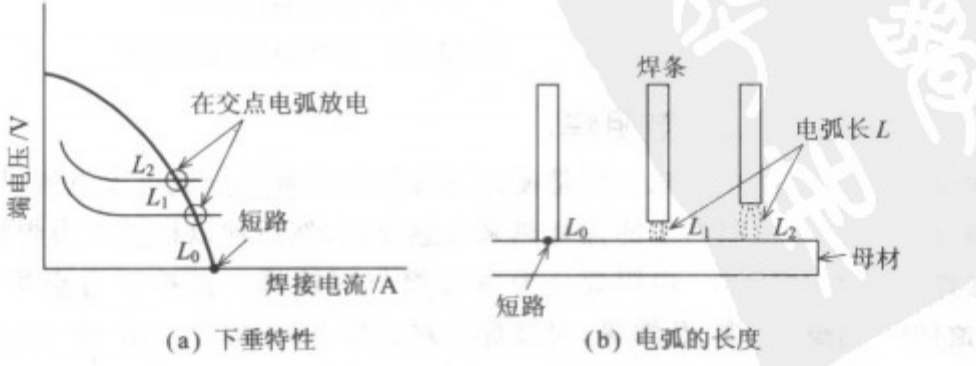


图 10.46　下垂特性示例

电弧焊接用电源

下垂特性

负特性

电弧焊接用的电源有直流式与交流式，一般多使用交流式。电弧焊的电源要求有电弧稳定而且持续的**下垂特性**。下垂特性就是当焊接电流增加时，端电压有急剧下降的**负特性**。电弧的长度与下垂特性示于图 10.46。

8　电　解

要　点

电解液中插入电极流过电流时，由于电极与电解液中的分子或离子的电中和，产生化学变化并分解出物质。这个作用叫电解。

解　释

水溶液的电解

以电解(electrolysis)的例子来看，水或水溶液的电解如下所述：

水的电解——→氢・氧

食盐水的电解——→氢・氯・氢氧化钠(苛性碱)

金属离子的电解——→锌・铬・锰・镍・镉等

电解食盐水产生的化学变化是

$$2NaCl+2H_2O \xlongequal{} 2NaOH+H_2+Cl_2$$

图 10.47 表示在电极上分别产生

阳极——→氯气(Cl_2)

阴极——→氢气(H_2)，氢氧化钠(NaOH)

图中还示出用铂作电极，是因为铂的离子化倾向小，化学性能稳定。

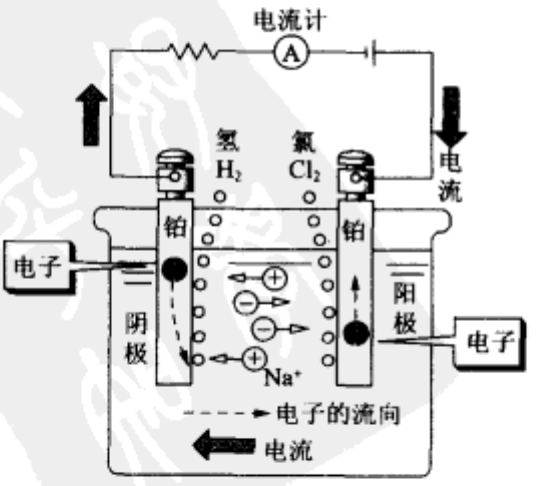


图 10.47　电解食盐水

法拉第定律

法拉第对于由电解在两电极板上析出物质的量，发现以下电解的规律。

第 1 定律

第 1 定律：电极上析出物质的量与电解液中流过的电量成正比。

第 2 定律

第 2 定律：电极上析出物质的量既和电解液中通过的电量成正比，也和该物质的化学当量成正比。

因此在电极上析出物质的量 W 可用下式表示：

$$W=kIt \quad (g)$$

其中，k 为比例常数(电化学当量)(g/C)；I 为电解液中流过的电流(A)；t 为流过电流的时间(s)。

如以 Q(C)表示电量，则

$$Q=It \quad (C)$$

$$W=kQ \quad (g)$$

电化学当量

比例常数 k 是由物质决定的常数，是 1C 的电量析出的物质量，这叫电化学当量。使用的单位是(g/C)，表 10.2 示出各种物质的电化学当量。

此外，物质的化学当量是原子量除以原子价的值，而与化学当量相当的克数叫做 1 克当量。故

$$1\text{ 克当量}=\frac{\text{原子量}}{\text{原子价}}$$

表 10.2 各种物质的电化学当量

元 素	离子	原子价	原子量	电化学当量 ($\times10^{-3}\times$g/C)	A·h 的析出量 /(g/A·h)
氢	H^+	1	1.0080	0.010444	0.0376
钠	Na^+	1	22.9898	0.23833	0.858
银	Ag^+	1	107.868	1.11805	4.025
铜	Cu^{2+}	2	63.546	0.32944	1.186
镍	Ni^{2+}	2	58.71	0.30416	1.095
锌	Zn^{2+}	2	65.37	0.3388	1.220
铝	Al^{3+}	3	26.9814	0.09305	0.335
氧	O^{2-}	2	15.9994	0.082888	0.2984
氯	Cl^-	1	35.453	0.3675	1.323

9 电　池

要　点

物质在起化学变化时放出能量(电动势)。利用这种现象的装置叫电池。

利用化学反应的电池可大致分为一次电池、可充电电池(二次电池)和燃料电池。

解　释

电池的种类示于图 10.48。

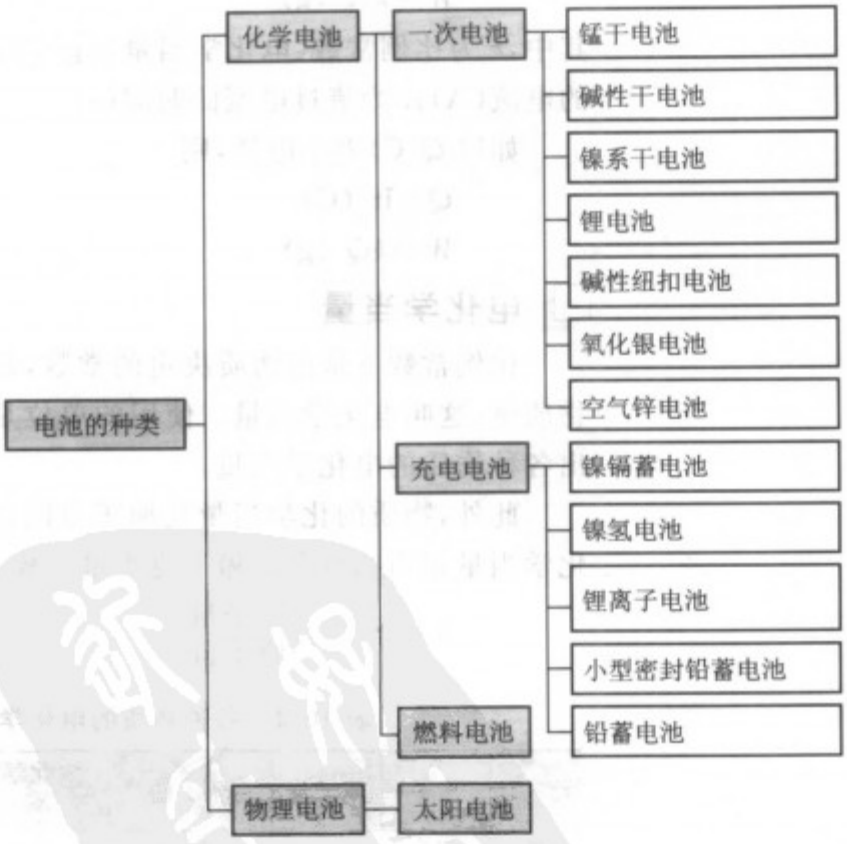


图 10.48　电池的种类

一次电池

一次电池就是一旦用完电就不能再充电使用的电池。在一次电池中有电解质为糊状或含浸状的干电池,以及电解液是液体状的湿电池。

主要的一次电池种类

锰干电池 以往使用的一般电池。

碱性干电池 与锰干电池相比较，电压不易下降。可替代锰干电池。

锂电池 用作照相机等电子机器的电源。耐储存，可靠性好。

空气电池 可代替水银(污染环境)电池，用在呼机、助听器、手表、照相机等。它的特点是：质量轻，能量密度在现有电池中最大。

锰干电池是最有代表性的干电池。构造示于图 10.49。

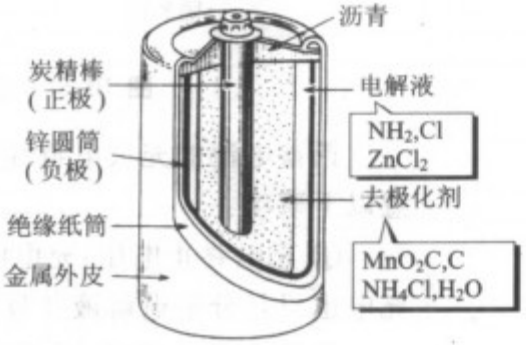


图 10.49 锰干电池的构造[1)]

可充电电池

对于可充电电池，当电动势降低时再充电可以恢复，还可再次使用。典型的充电电池是铅蓄电池与碱性蓄电池。

主要的充电电池种类

铅蓄电池 主要作为车用蓄电池。

小型密封铅蓄电池 可以大电流放电，用在 UPS(小型停电备用电源)及通信方面。

镍镉蓄电池 有代表性的小型蓄电池，用在家电或办公设备中。

镍氢蓄电池 容量比镍镉蓄电池加倍，而电压相同。可替代镍镉蓄电池。不含镉，有利于环保。

锂离子蓄电池 特点是容量和电压都比镍氢蓄电池高，但昂贵。

除了上述以外，还有镍铁蓄电池（爱迪生电池）等。

铅蓄电池的构造　最常见的铅蓄电池的构造示于图 10.50。

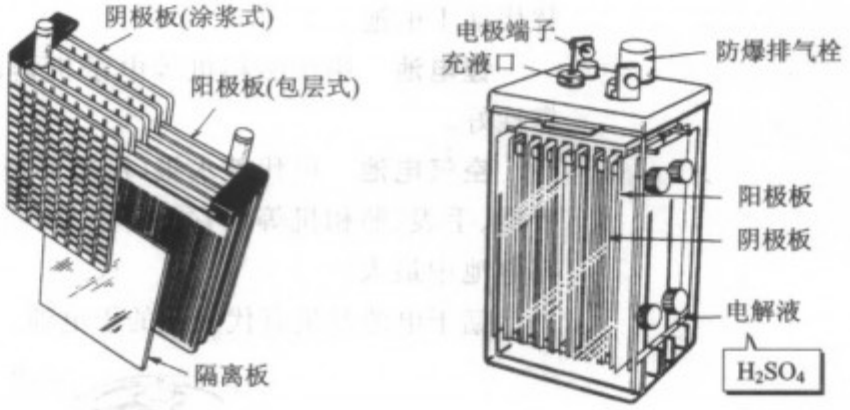


图 10.50　铅蓄电池的构造

铅蓄电池的充放电特性　铅蓄电池充电、放电时必须注意以下事项：

① 充电终止电压：充电时如果电压很快上升，即使继续充电也只是分解电解液并放出氢气。此电压称为充电电压。

② 放电终止电压：放电时如果电压很快下降，再继续放电就会损伤极板（硫酸盐化现象），会减少充电容量。此电压称为放电终止电压。

常用的充电电池示于表 10.3。

表 10.3　常用的充电电池

种　类	正　极	负　极	电解液	隔　板	标称电压/V	主要用途
铅蓄电池	PbO_2	Pb	稀 H_2SO_4	聚乙烯无纺布玻璃板等	2	汽车
小型密封铅蓄电池	PbO_2	Pb	稀 H_2SO_4	玻璃板	2	AV 机器，通信机器、UPS
镍镉蓄电池	NiOOH	Cd	KOH	聚酰胺无纺布	1.2	AV 机器、办公机器、电动工具
镍氢蓄电池	NiOOH	MH（金属氢化物）	KOH	聚丙烯无纺布	1.2	通信机器、AV 机器
锂离子充电电池	$LiCoO_2$	C_xLi	有机电解液	聚乙烯微多孔膜	3.6～3.7	通信机器、AV 机器、办公机器

燃料电池

一次电池或充电电池都是靠电池内有发生化学变化的物质，燃料电池是从外部供给化学物质，发出电能。

燃料电池的原理　在水中通电可以引起电解反应，放出氢气和氧气。燃料电池是用相反的原理，就是使氢和氧直接反应燃烧。虽然是全部变成了热能，但是燃料电池经过电化学的原理可以取出电能使用(参看第 8 章)。

在可充电电池中，除了汽车上使用的大型铅蓄电池之外，小型蓄电池还有镍镉蓄电池、镍氢蓄电池、锂离子电池等种类。其中，在笔记本电脑、数码相机、手机中使用最多的是锂离子电池。以下说明锂离子电池的特点及工作原理。

锂离子电池的特点

① 电压高：单电池的电压达到 3.6～3.7V，可以减少使用电池的个数。

② 能量密度高：高能量密度有益于电子设备的小型化、轻量化。

③ 没有记忆效应：对于镍镉电池、镍氢电池来说，如果充电不足或放电不够就会减少电池容量。这就是记忆效应。锂离子电池没有记忆效应，对于常需要临时充、放电的机器很方便。

④ 寿命长：可以充、放电 500 次以上。

⑤ 保存特性好：自放电率在 10%以下。

⑥ 优异的放电温度特性：可在－20～60℃的温度范围内使用。

⑦ 对环境有利：不使用铅、水银、镉，使用后不污染环境，容易处理。

图 10.51 所示锂离子充电电池的工作原理。

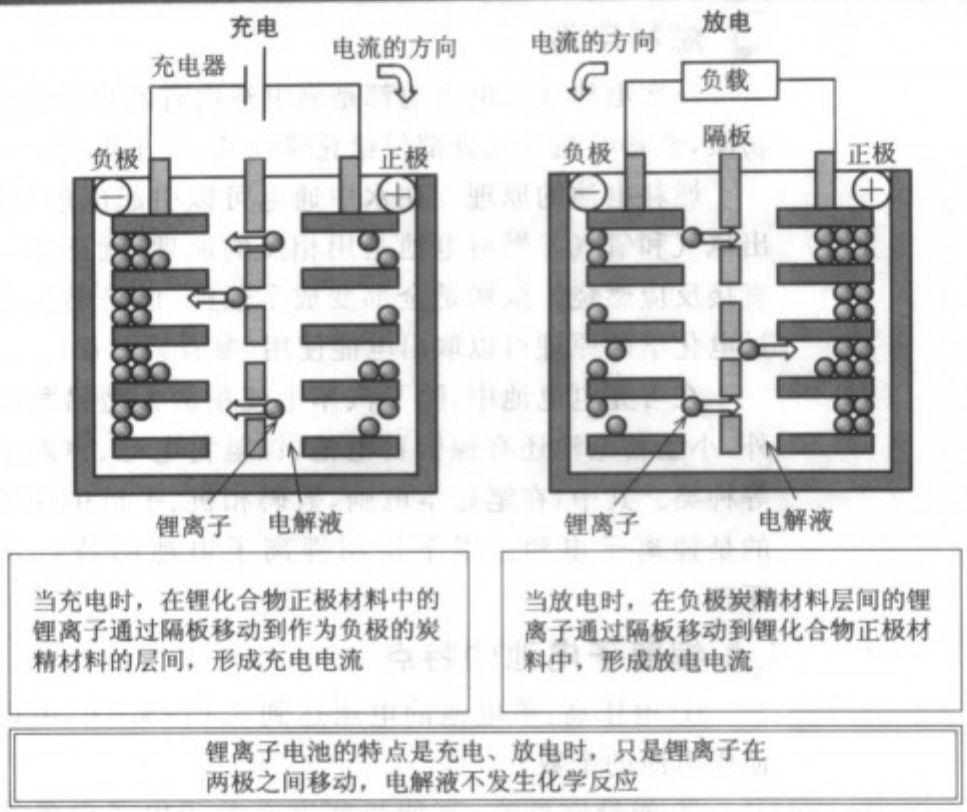


图 10.51　锂离子充电电池的工作原理

例　题

[1] 在硝酸银($AgNO_3$)的水溶液中，如果有 1h 流过 10A 的电流。在阴极上析出什么物质？有多少克？

答　硝酸银的水溶液电离为

$$AgNO_3 \rightarrow Ag^+ + NO^{3+}$$

根据表 10.3，银(Ag)的化学当量是 $1.118\ 05\times10^{-3}$ g /C。因 $W=kIT$ (g)

$$W=1.118\ 05\times10^{-3}\times\ 10\times\ 3\ 600=40.249\ 8(g)$$

所以，在阴极上析出银(Ag)40.25g。

10　电车线路与车辆

要　点

电气铁道的供电有直流方式与交流方式。针对不同目的，供电的电车线路及行驶的电车也有许多种类。

解　释

供电方式及电车线路

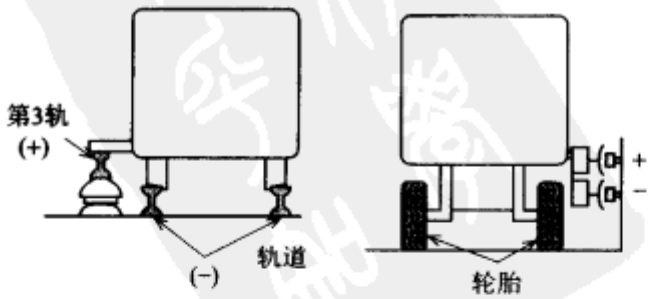
直流方式与交流方式　两种方式都是把发电厂送来的工频 50Hz 或 60Hz 变换成三相交流 22～77kV 以下的电压，再供给电车线路。

直流方式是使用将交流电变换为直流电的装置(水银整流器或现在是主流的晶闸管整流器)，变成直流 1 500V、700V、600V 等供给电车线路。

交流方式是利用变压器将交流电力降压(新干线是 25kV，其他铁路是 20kV)后，再供给电车线路。

电车线路　将电力供给车辆的电车线路在构造上有以下几种：

架空单线方式一般是一条架空线。架空复线方式现在几乎没有，主要用在无轨电车等。第 3 轨条方式是与两条行驶轨道平行铺设有第 3 条铁轨，车辆用这条轨道集电。这种方式对于希望隧道断面积小的地铁等有利。刚体复线方式则是适合独轨铁路或新的交通系统等用橡胶轮行驶的车辆(见图 10.52)。



(a) 第3轨条方式　　(b) 刚体复线方式

图 10.52　电车线路

电车的种类

按照供电的种类，电车分为直流电车、交流电车及交直流电车。

直流电车

直流电车使用的是直流电，用直流电动机驱动。

交流电车

交流电车使用的是交流电，用车上的变压器降压，再通过整流器变成直流后使直流电动机旋转、驱动。另外，也有将降压后的交流电再用斩波控制使直流电动机旋转，或用逆变器控制使感应电动机旋转以驱动车辆。

交直流电车

交直流电车能在直流、交流两种供电的区间通行，靠切换车辆的机器驱动。

题外话

日本铁路线性电动机车辆的磁悬浮原理

根据感应排斥原理(参看本章 12 节)，由轨道一侧与车辆一侧的磁铁的排斥力形成悬浮。可是安装在轨道一侧的悬浮绕组中并不是本来就有电流，也不发出磁力。那么是什么原因使轨道一侧的绕组发出磁力呢？这是因为磁铁接近绕组或远离绕组时，由于电磁感应在绕组中产生电流，相对的磁极会发出相同极性的磁力。磁铁的速度越快产生的磁力越大，所以到 100km/h 左右的速度时就可以支持车轮行驶(见图 10.53)。

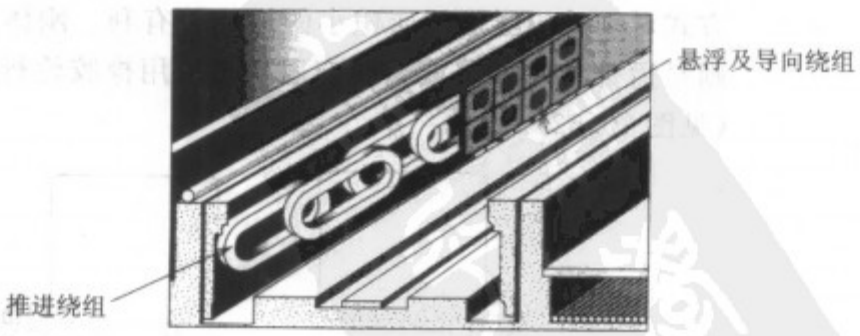


图 10.53　导轨绕组的配置

11 电车的控制与安全运行

要点

电车用的电动机有许多种调速方法。根据运行曲线可以知道电车的速度及需要的时间，编制出运行时刻表。为了电车安全运行还设有各种安全装置。

解释

电车电动机与速度控制

电车有直流电车与交流电车，使用的电动机及控制方式也是多种多样，汇总列于表 10.4。

表 10.4 各种电动机及控制方法

电车种类	控制方法	使用电流或变换方式	主电动机
直流电车	电阻控制(串并联控制+磁场控制)	直流	直流串励电动机 直流复励电动机
	晶闸管斩波控制	直流	直流串励电动机 直流复励电动机
	逆变器控制(VVVF)	直流→交流	三相异步电动机
交流电车	分接头控制	交流→直流	直流串励电动机 直流复励电动机
		交流	单相交流整流子电动机 三相异步电动机
	晶闸管相位控制	交流→直流	直流串励电动机 直流复励电动机
	逆变器控制(VVVF)	交流→直流→交流	三相异步电动机

电阻控制

电阻控制是使加到直流电动机的电压及磁场的磁通变化以改变速度。在主电动机中串联以电阻，通过电阻的增、减来控制速度。但是只用这一种方法会使输入功率的一部分在串联电阻上成为热量消耗掉，使效率低下。所以还要合并使用主电动机串并联切换的串并联控制或使磁场电流变化的磁场控制。

斩波控制

斩波控制是将 GTO(Gate Turn Off)晶闸管当作开关使用。如图 10.54 所示，利用改变通和断的时间来改变脉冲的宽度，使加到直流电动机上的电压(平均电压)变化来调节

速度。

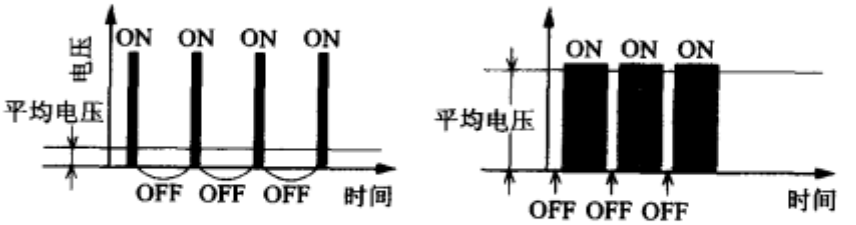


图 10.54　斩波控制

逆变控制

逆变控制是用感应电动机作为主电动机，要使转速变化必须使频率变化。为此使用 GTO 晶闸管先把直流变为交流，为调速用的频率及电压的控制也是通过 GTO 晶闸管通和断的时间来实现。这种方式也称为 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)方式。

分接头控制

分接头控制是在车辆变压器的原边或副边设置若干个中间抽头，通过开关的切换来调整电压的方式。使用直流的场合要在变压器的副边配置整流设备。

晶闸管相位控制

晶闸管相位控制是在车辆变压器的原边或副边由二极管及晶闸管组成的整流桥路。要使作为主电动机的直流电动机的速度发生变化，与斩波控制同样想法，将整流后波形的一部分用晶闸管的通断控制，使加到电动机上的电压发生变化。

运行曲线

电车按照预先确定的方式运行。电车有三种行驶方式，就是：①电动机接通电源后电车加速的**动力运行方式**；②切

动力运行方式

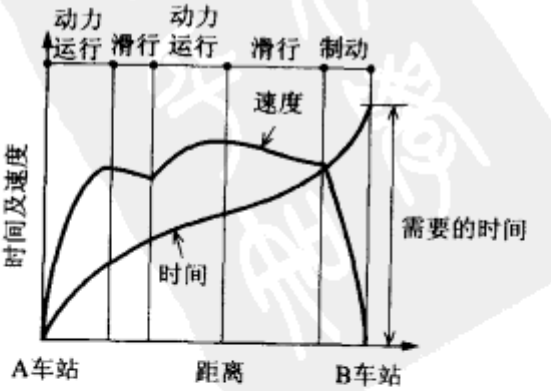


图 10.55　运行曲线

滑行方式
制动方式

断电动机的电源，电车靠惯性行驶的**滑行方式**；③加上制动，使电车减速的**制动方式**。

把这些运行状态以图形表示就是运行曲线（见图10.55）。由此图可以知道电车的速度及所需时间，可以编制运行时刻表。

安全装置与运行的自动化

为了使电车安全运行，设有各种安全装置，其功能如下：

列车自动停止装置（ATS：Automatic Train Stop）　是对于看到信号机表示停止（红色）的信号却不停止的电车，能使操纵台的警报器鸣响并点亮红灯以示警告。然后在一定时间内进行制动操作，如仍不能停车就进行紧急制动。

列车自动控制装置（ATC：Automatic Train Control）是采用在新干线等处的系统。在平时显示车辆的适当速度，超过该速度行驶时让制动起作用，调整到适当的速度。

列车自动运行装置（ATO：Automatic Train Operation）是以ATS、ATC的减速控制功能再加上加速控制功能，从启动到停止自动进行。

列车集中控制装置

除上述外，还有列车无线通信装置、CTC（**列车集中控制装置**）以及用计算机自动运行管理新干线的COMTRAC等，以实现更安全、更舒适的列车运行。

题外话

日本铁路线性电动机的推进原理

车辆上的超导磁铁是N极与S极交互配置。轨道上的推进绕组也配置成N极与S极（见图10.56）。此时超导磁铁与推进绕组的N极和S极相互吸引，N极与N极，S极与S极则相互推斥，使列车前进。此外，推进力也就是加速力，可由加大推进绕组的电流以增强磁力来达到。要提高速度，必须相应于速度进行切换推进绕组的N极、S极，这可以用改变电流的频率来实现。

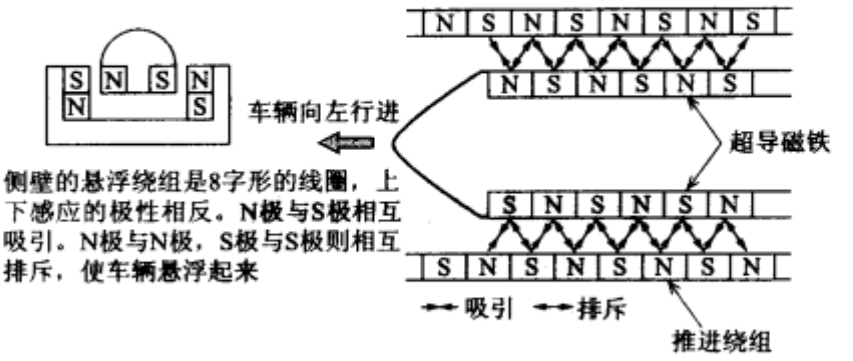

S N S N
N S
车辆向左行进
侧壁的悬浮绕组是8字形的线圈，上下感应的极性相反。N极与S极相互吸引。N极与N极，S极与S极则相互排斥，使车辆悬浮起来
N S N S N S N S
N S N S N S
超导磁铁
S N S N S N
S N S N S N S N
吸引
排斥
推进绕组

图 10.56　推进的原理

12 各种各样的交通系统

要点

有高速行驶和巨大输送能力的新干线铁道，近年在各地采用的新都市交通系统，以及作为下一代高速交通而引人注目的线性电机驱动车等。

解释

新干线铁道

新干线铁道为了能高速行驶，用通常的机构和系统会受到限制，所以采用以下的技术及方法：

① 为得到稳定的行驶性能采用宽轨。

② 取足够大的弯道半径。

③ 没有陡坡。

④ 开发大功率的动力装置。

⑤ 开发能供给大容量电力的装置。

⑥ 设置高可靠性的装置。

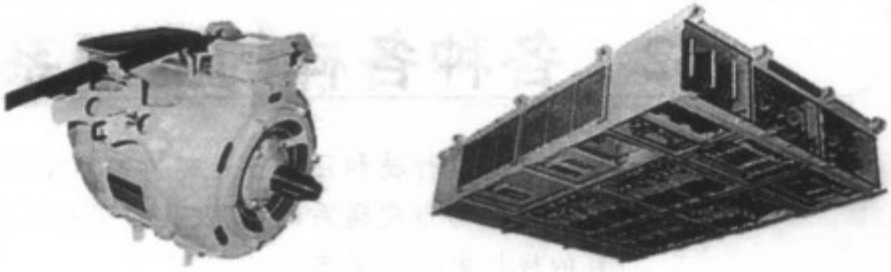
线路 从改善高速稳定性方面考虑，新干线铁道的轨距不用通常的**窄轨**(1067mm)，而是采用**标准轨**(1 435mm)。除去城市部分，最小弯道半径是 4 000m，(一部分是 2 500m)。此外，通常铁轨是用鱼尾板连接，但在超过 200km/h 的速度时，铁轨接缝会因冲击而损坏，所以将 25m 的铁轨焊接，使用平均长度为 1 500m 的长轨。

窄轨　标准轨

动力系统 采用在大小及输出方面都优越的电气方式，还要考虑高速行驶的集电和变电所的间隔等方面，要尽可能减小集电电流，采用可在车内降压的交流高压方式(25kV)。把动力源的电动机分散在各节车的全电动车方式，这样做可增加每一节车的功率，提高加速性能及均衡速度，同时在高速时的制动可使用**发电制动**、**再生制动**，在安全性、经济性方面也有诸多筹划。

发电制动
再生制动

电动机的控制方式，以往用低压分接头控制直流电动机或用晶闸管的相位控制，现在转移到用 VVVF 控制感应电动机(见图 10.57，表 10.5)。



(a) 300kW三相感应电动机　　(b) VVVF控制装置

图 10.57　300 系列新干线(愿望)的主电动机及主变换装置(JR 西日本)

表 10.5　300 系列新干线车辆的主要诸元

电气方式	AC 25kV, 60Hz
最高速度	270km/h
平坦路段均衡速度	296km/h
动力行驶控制方式	VVVF 感应电动机驱动方式
制动控制方式	交流再生制动并用电气指令式空气制动(拖挂车是涡流制动)
转向架	车轮直径 0.86m,轴距 2.50m,无车架承梁方式
主电动机	三相笼型感应电动机,40 台/1 编组,300kW/台,强制风冷式,12 000kW/1 编组
导电弓架	2 元系列支持方式,3 台/1 编组
ATC	2 频率方式

保安系统　利用 ATC(Automatic Train Control:列车自动控制装置)保证列车相互间的安全,并指示列车在必要的地点减速或紧急停车。

新都市交通系统

新都市交通系统的定义是:“技术上改善以往的交通系统及与现有运输手段模式不适应的各种交通手段的总称”。

其中还可举出以专用导轨来自动控制车辆行驶的橡胶轮胎式中量轨道运输方式 AGT (Automated Guideway Transit)。

AGT

这个交通系统不需要从卫星城到铁路车站为接送运输所配备的铁路或地铁等,当公共汽车不能应付上下班高峰

时它是合适的交通工具。与其他交通系统的比较示于表10.6。

表 10.6 都市陆地公共交通系统的比较

	地 铁	独轨铁路	AGT	路面电车	公共汽车
单方向每小时运力	40～50 千人	15～20 千人	10～15 千人	10～15 千人	5～10 千人
一般速度/(km/h)	25～30	25～30	15～25	10～15	10～15
最小间隔/min	2	2	1.5～2	1.5～2	1.5～2
运送单位/千人	1.5～2.5	0.5～1.0	0.3～0.5	0.2～0.3	0.1
车站间隔/km	1.0	0.7～1.0	0.5～0.7	0.3～0.5	0.3～0.5

AGT 的特征如下。

① 以电为动力行驶。

② 用橡胶轮胎在轨道上行驶。

③ 可以走小的弯道。

④ 可以走大的坡度。

⑤ 设置高架导轨。

⑥ 可自动驾驶。

⑦ 列车运行可用计算机集中管理。

⑧ 最大运输能力是 5 000～15 000 人/h。

导向轨道

动力系统采用电气方式，与**导向轨道**平行敷设刚体电车线，三相交流用 3 条线，直流则用 2 条。使车两侧的集电装置与之接触并集电。因为是用胶轮，最高 60/1 000 的斜坡或最小弯道半径 25m 都能行驶(见图 10.58)。

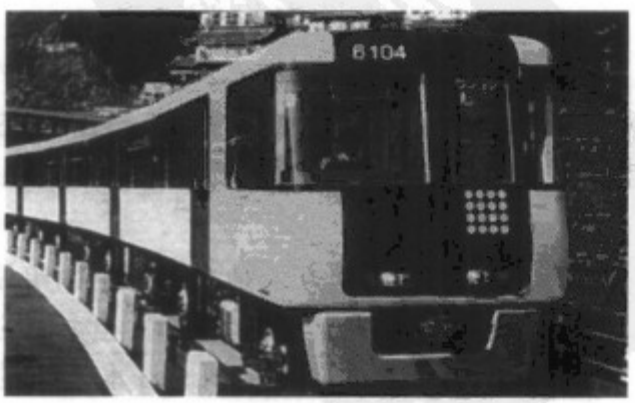


图 10.58 新都市交通系统(AGT)的例子
(广岛高速交通阿斯特朗线)

车辆两侧的导向轮与导向轨道接触并沿着行驶轨道前进。其中有在行驶轨道的左、右两侧设置导向轨道的侧面导向方式，与在行驶轨道中心设置一条导向轨道的中央导向方式。在分线方式上有可动导向式及上下沉浮式等。

图 10.59 是导向轨道的分线装置。可动导向板 A 在图示的位置是向前直行。当 A 是向左拉进，B 为向右伸出状态时，车辆行进到右边的轨道。

列车自动运行装置

在这个交通系统中，由 ATO(Automatic Train Operation，**列车自动运行装置**)对车辆的减速、加速以及列车从启动到停止的所有运行自动进行控制。为了上、下车安全，站台一侧的车门也是连动开启和关闭。用这些保安系统及利用计算机对列车进行集中管理，使自动运行成为可能。

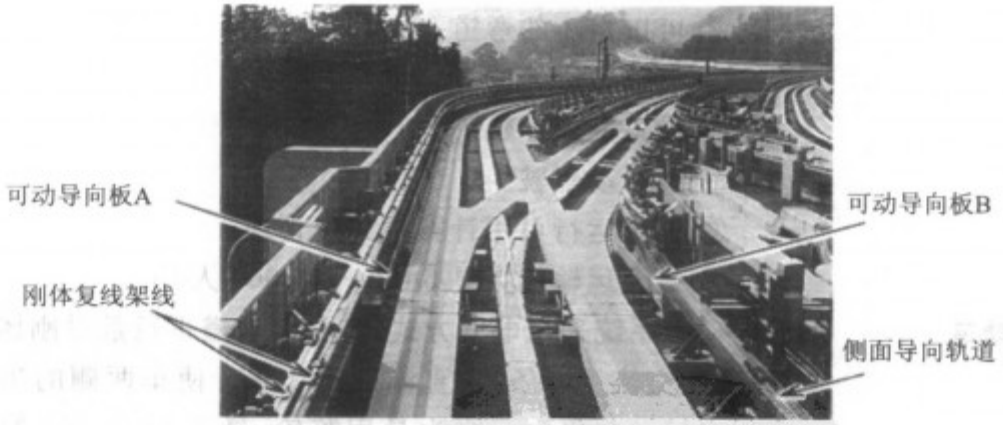


图 10.59　导向轨道的分线装置

线性电机驱动车

线性电机　线性电机驱动车是以线性电机为动力源，在线性电机中有 LSM (Linear Synchronous Motor，**线性同步电机**)方式和 LIM(Linear Induction Motor，**线性感应电机**)方式。

线性同步电机
线性感应电机

LSM 方式是在轨道上固定原边绕组，通以交流电，副边绕组就是运动的车辆。电动机的速度用流过轨道上原边绕组电流的频率控制。日本铁路的线性电动机车及德国的特郎斯拉皮德采用这种方式。

LIM 方式是把原边绕组固定在车辆上，副边绕组固定

在轨道上。原边绕组通以交流电，速度由此频率控制。这种方式用在日本航空的 HSST 及车轮式线性电动机车的地铁中。

车轮式线性电动机车　使用这些线性电机的列车有靠车轮行驶的，有用悬浮方式行驶的。

车轮式线性电动机车的原边绕组装在车体下部，相当于副边绕组的反作用力板安置在两条轨道之间以得到推进力。车轮只是支持车身。

由于可以将以往列车地面下安装电动机及驱动装置的空间变小，结果隧道的高度和断面积都可以做小，从而能够降低建设成本是其优点，用在地铁（见图 10.60）。此外，还因没有电动机及齿轮等驱动装置，车轮也像汽车那样的转向构造，所以噪声低。



图 10.60　车轮式线性电动机车
（大阪市交通局鹤见绿地线）

悬浮式线性电动机车　利用磁悬浮的原理，有吸引式和感应推斥式。

吸引式　利用磁铁与铁的吸力，德国的特郎斯拉皮德和日本航空的 HSST 与此相应。车身侧面安装常电导磁铁，

用传感器测定与轨道的间隔并控制磁铁的电流以保持一定的间隔(见图 10.61)。由于使用常电导磁铁,悬浮高度为 1cm 左右。在此基础上,特郎斯拉皮德用 LSM 方式,HSST 用 LIM 方式的线性电机推进。

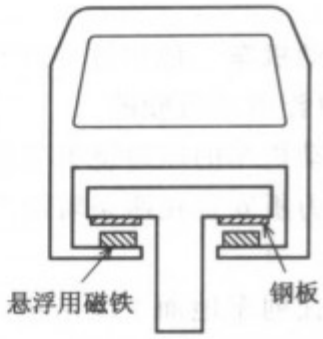


图 10.61　吸引式线性电动机车

感应推斥式　利用相同磁性磁铁间产生的推斥力,是日本铁路采用的方式。

日本铁路的线性电动机车与其他种类相比较,其最大的不同之处是车上用于悬浮和推进的磁铁,使用能持续产生强大磁力的超导磁铁。所以车上载有液态氮冷却装置(见图 10.62),以保持绕组为超导状态。

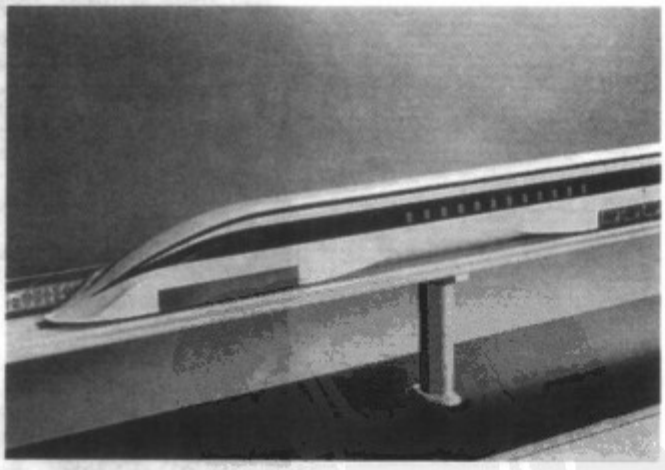


图 10.62　山梨县线性电机试验车辆
(JR 东海)

13 机械电子学基础

要点

所谓机械电子学就是机械学(Mechanics)或机构学(Mechanism)与电子学(Electronics),进一步是将各种信息技术结合并系统化的应用范围很广泛的技术。特别是近几年,随着以计算机及大规模集成电路为首的技术开发,这方面有显著的发展。

解说

传感器、计算机、执行机构的关系

机械电子学的系统构成要素如下。

相当于人脑的部分:

传感器(感觉) 将力、光、温度等各种信息变为电信号的元件。

计算机(判断) 完成输入输出的控制、数据处理,以及发出各种识别、执行指令的装置。

相当于人肌肉的部分:

执行机构(动作) 将各种能量变换为机械能的装置。

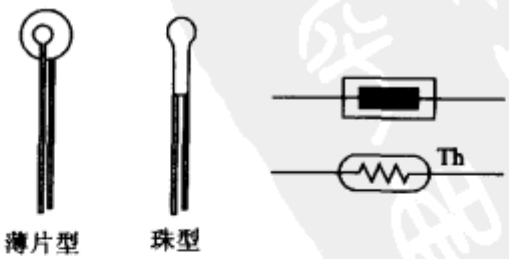
传感器

传感器是构成机械电子学系统的要素之一,将各种信息(温度或位置等)变换成电信号,所以也叫信号转换元件。

以下列举几种代表性的传感器:

热电变换元件
温度传感器

① **热电变换元件**(**温度传感器**)。热电偶、热敏电阻(见图 10.63),半导体温度传感器,测温电阻体。



(a) 外观 (b) 符号

图 10.63 热敏电阻

光电变换元件
光传感器



图 10.64　硫化镉

② **光电变换元件(光传感器)**。光电管、光电倍增管、光电池、光敏三极管、光电元件(硫化镉等，见图 10.64)、光敏二极管(PD)。

压敏元件
压力传感器

③ **压敏元件(压力传感器)**。半导体应变计、压敏二极管、压敏三极管、压电半导体。

红外线传感器

④ **红外线传感器**。基于红外线传感器的工作原理，大致分为热型红外线传感器及量子型红外线传感器两种。

热型红外线传感器的灵敏度及响应速度低，但波长区域宽，可在常温下使用。特点是使用简便。

量子型红外线传感器的特点是：检测灵敏度高，响应速度快。红外线传感器的种类示于图 10.65。

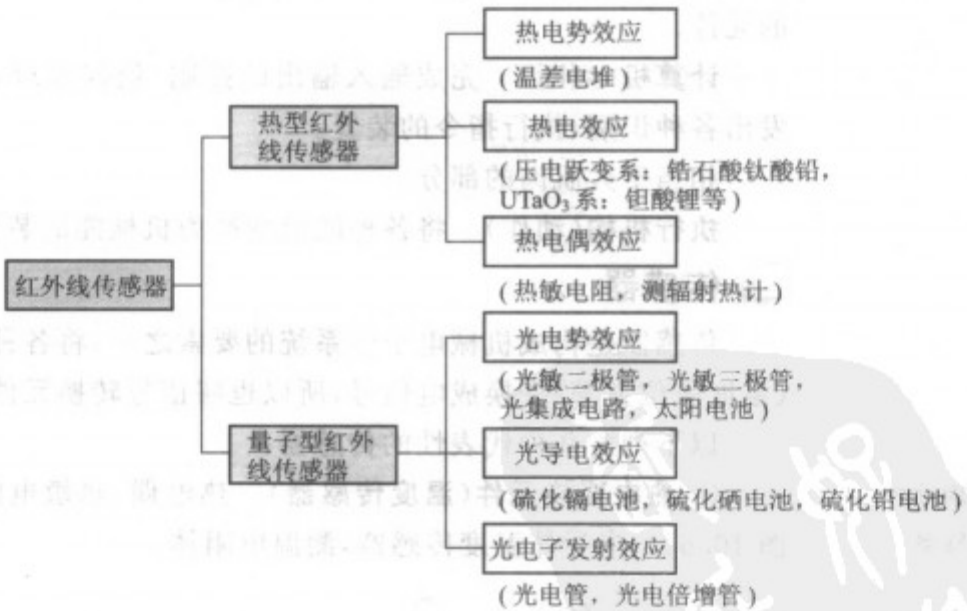


图 10.65　红外线传感器的种类

⑤ 其他传感器。磁传感器，超声波传感器，气体传感器，湿度传感器等。

微处理器

微处理器

微机的中央处理单元(CPU)叫做**微处理器**。微处理器由控制装置与运算装置组成。微处理器有两种，即通用微处理器与专用微处理器。

以下是计算机与微处理器的构成。

- 计算机
 - 主记忆装置
 - 输入、输出装置
 - 中央处理装置
 - 控制装置
 - 运算装置
- 微处理器
 - 通用微处理器
 - 专用微处理器
 - 数字信号处理
 - 声音识别
 - 图像处理
 - 其他

专用微处理器是以对应特定的功能要求及用途为目的，所以在大规模集成电路中不仅有 CPU 的功能，还多带有主记忆装置及输入、输出装置的功能。这也是最近大规模集成电路制造技术的进步带来的(见图 10.66)。

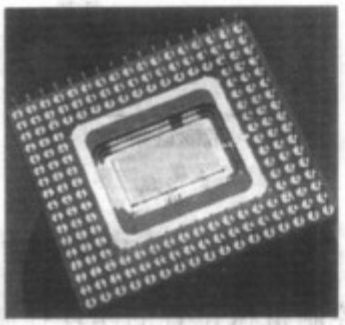


图 10.66 微处理器[3)]

执行机构

执行机构

执行机构(actuator)是把各种能量变换成机械能的装置。在机械电子系统中，具有相当于人的肌肉的功能。执行机构另一重要功能是能够进行准确定位的操作。

下面列举具有代表性的一些执行机构。

油压式执行机构

① **油压式执行机构**：利用油压活塞的往复运动，借助齿条、齿轮等变成旋转运动。

气动式执行机构

② **气动式执行机构**：利用气压缸内活塞的往复运动进行定位。

电动式执行机构

③ **电动式执行机构**：利用电磁力或电动机产生直线运动或旋转运动。

橡胶执行机构

④ **橡胶执行机构**：在合成纤维编织的橡胶管内充以空

气，利用橡胶可伸缩的特点，实现人的关节屈伸动作。

相关知识

◆ 定位机构与伺服机构

执行机构的基础是定位机构，以及加在定位机构上的动力和控制功能的伺服机构。说明如下。

定位机构能够确定机床或产业用机器人可动部分空间位置的机构，种类很多。将具有代表性的定位机构示例于图 10.67。

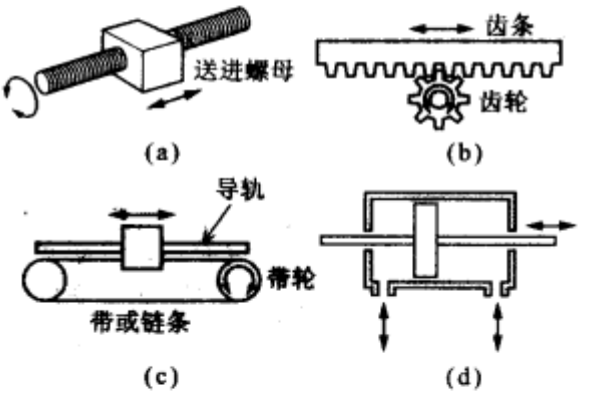


图 10.67　定位机构[4]

伺服机构是控制机械位置的闭环控制系统的总称，由检测目标值的检测部分及达到与目标值一致的控制部分组成，动力伺服机构的构成示例于图 10.68。

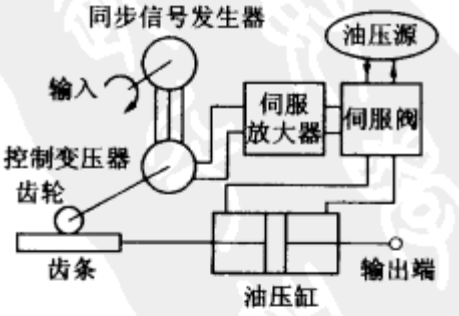


图 10.68　伺服机构的构成示例[4]

14 机器人与工厂自动化

要 点

基于机械电子学的工厂自动化，即自动生产系统叫做机器人(产业用机器人)。

解 释

产业用机器人

按照输入信息或教授方法，将产业用机器人分类如下(参见图 10.69)。

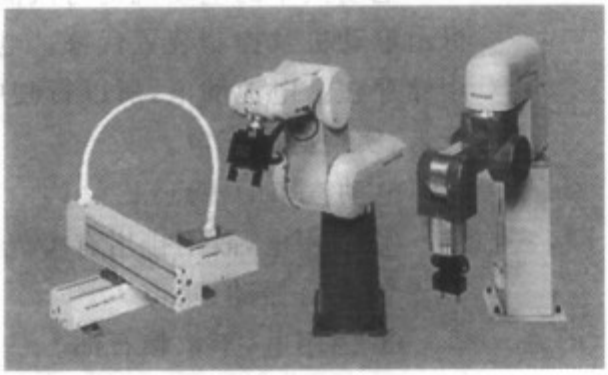


图 10.69 各种产业机器人
(三菱电机关西加工技术中心)

操纵机器人 由人来操纵的机械手，机械手是具有类似人的手臂、手腕的功能，可使对象物在空间移动。

顺序控制机器人 是按照预先设定的顺序、条件及位置，逐步进行各阶段动作的机器人。有容易变更设定信息的可变顺序机器人及不容易变更的固定顺序机器人。

示教再现机器人 根据人预先操作机械手所给予的指示，使之记忆操作的顺序及位置等，必要时能进行读出操作的机器人。

数控机器人 用数值使之记忆顺序或位置等信息，并按指令进行操作的机器人。代表性有**数控机床**。

数控机床

智能机器人 根据感觉功能及识别功能决定行动的机器人。

15　其他电气技术应用

要　点

电气技术的应用，特别是因计算机的飞跃进步，不仅在工业生产，在社会的方方面面都得到广泛应用。

在其他方面，还可列举电动汽车、电加工、超声波应用以及静电现象的应用。

解　释

❑ 电动汽车

电动汽车的电动机构与汽油汽车比较，动力机构的发动机由电动机及控制装置代替。电动汽车不使用汽油，而是使用储存在蓄电池的电，所以行驶中没有有害气体排出。为了行走，实现必须充电。

电动汽车的优点：

① 因用电，故不排出有害气体。

② 没有振动、噪声。

③ 因用电，不依赖石油。

④ 减速时可回收能量，效率好。

电动汽车的缺点：

① 持续行驶距离短，承载量少，所以用途有限。

② 现在只能少量生产，电池价格高，因此单台成本高。

③ 充电需要时间(充电时间 4～8h)。

根据电池种类、充电方式不同，电动汽车分好几种。基本上由交流直接转换成直流而充电。

① 充电方式

• 感应充电：利用电磁感应传送能量的方法。

• 导电充电：通过电连接传送电能的方法。

② 充电器的种类

• 固定型充电器：安装在车体外。用于感应充电、快速充电。

• 车载型充电器：汽车上可安装的充电器。只要有 200V(注：日本交流电为 200V)交流电源即可充电。

• 携带型充电器：改良固定型充电器为可携带的充

电器。

③ 充电时间及充电方法的种类

• 普通充电：最基本的充电方法，特别是使用深夜的电力时经济。充电时间为 4～8h。

• 均匀充电：为了要保持电池的充电状态，定期地充电的方法。

• 快速充电：用大功率短时间内充电的方法。用快速充电器 30min 可充电 50%。

• 紧急充电：电用尽且紧急的情况下用 100V 电源充电的方法。充电需要长时间。

燃料电池车

燃料电池车是用燃料电池发电行走的电动汽车的一种。和汽油汽车一样需要补充燃料，所以期待将来替代内燃机汽车。

燃料电池车的优点：

① 能量利用效率好。

② 不排出或少排出有害气体。

③ 不依赖于石油。

④ 不需要充电。补充燃料可行驶长距离。

燃料电池车的缺点：

① 若使用氢或甲醇等，则需要燃料供给基础设施。

② 在开发中，因此在价格、性能等方面需要克服的课题较多。表 10.7 所列为燃料电池的种类。

表 10.7 燃料电池的种类

名 称	运行温度/℃	特 点
磷酸型(PAFC)	170～200	从 1960 年开始开发，用作大楼等的电源
熔融碳酸盐型(MCFC)	约 650	有可能利用包括正在改质的 CO 作为燃料，用于大规模工厂
固体电解质型(SOFC)	约 1 000	可期待用于煤气的高效率发电。正在研发耐热材料及构造
固体高分子型(PEFC)	100 以下	用在月球着陆的宇宙飞船。用高分子离子薄膜作电解质。工作温度低且小型，针对移动物体使用

混合动力汽车

混合动力汽车是将多数的动力源组合作用，且根据状况选择动力源，或者同时分别使动力源工作行驶的一种汽车。

混合动力汽车的优点：

① 可减少有害气体的排出。

② 提高耗油量。

③ 低噪声。

④ 可利用已有的基础设施，可在已有的服务工作站供给燃料。

混合动力汽车的缺点是需要系统的小型、轻型化和价格降低(因为需要多数动力源的缘故)。

组合动力源的典型方式有如下三种：

串联方式　为了延长充电行驶距离而提出来的方式，可一边充电一边行驶。一般采用带发电机的引擎作为。驱动汽车的动力源。

并联方式　主要考虑发电机的耗油量的提高、降低有害气体排出而提出的方式。以发动机为主体，发动机上加负载启动时或加速时使用电动机工作，补充驱动力。因为驱动汽车的动力源两个并行工作，而得此名。另外，减负载时发电机发电而进行充电，减少发动机的负载变动，在制动时或者行驶下坡时，通过再生制动回收能量，提高能量利用效率。

串并联方式　将以上两种方式组合，根据状况有时分别使用动力源，有时一并使用两个动力源的方式。具有专用的发电机，比并联方式更细致地进行发动机的负载控制，提高能量利用效率。

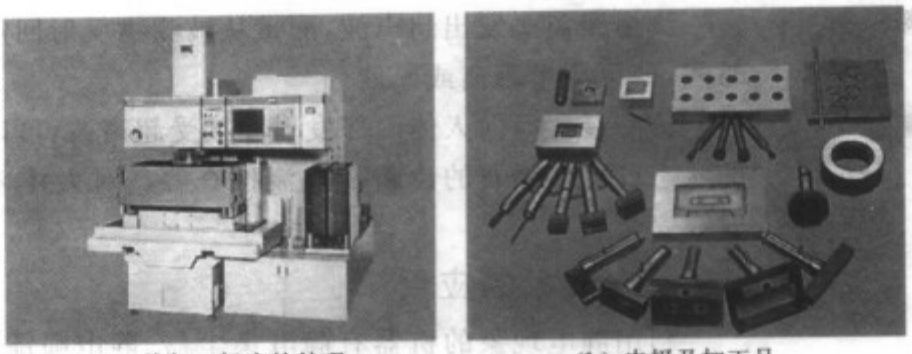
电火花加工与激光加工

在利用电能及光能加工工作物的方法中，有电火花加工与激光加工。

电火花加工　电火花加工机床是用放电的能量加工除去金属的最先进的机械电子机床。特别适合难切削材料的加工，是制造金属模具不可缺少的方法。电火花加工机床中有用金属丝作电极的线加工机床(见图 10.70)及用特定形

状电极的成形电火花加工机床。

激光加工 是将大功率的激光聚光以得到极高的能量密度，以此来照射，对各种金属、非金属，进行精密切断、焊接以及改变表面质量的加工。特别是在切断领域，作为一种适合于生产量少而品种多的机械，在钣金加工方面很快得到普及。



(a) 线加工机床的外观　　(b) 电极及加工品

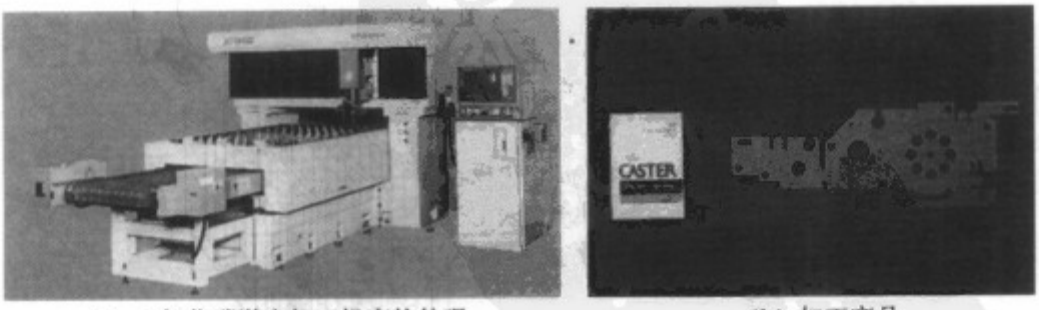
图 10.70 线加工机床

(三菱电机关西加工技术中心)

超声波应用

超声波

超过人在说话或听音乐时的声波频率(音频)，在20kHz以上的弹性波叫做**超声波**。工业上以大约15kHz以上作为超声波使用。超声波与光相似可以直线进行反射或折射，但与光不同的是它可以很好地在固体液体中传播。



(a) 二氧化碳激光加工机床的外观　　(b) 加工产品

图 10.71 二氧化碳激光加工机床

(三菱电机关西加工技术中心)

利用超声波的振动力可作洗净焊接及孔加工，还可利用超声波的信号传递及通信能力做人体内部的诊断、探测鱼群、工业探伤、流量测定、距离测定及浓度测定等。

应用超声波的机器

清洗

清洗　在液体中发射超声波时，利用它能使液体的大粒子加速及小空洞的发生和消灭，可用来以清洗工业零件。

焊接塑料

焊接塑料　超声波的重复振动可以使热塑性塑料的界面发热，不必使用黏合剂即可在瞬间将其焊接。

测量距离

测量距离　发出超声波，测量从被测物反射回声的传递时间，即可测量距离或厚度。

诊断装置

诊断装置　向人体内部发射和接受超声波，可以做胎儿的状态、肿瘤、结石的诊断及血流检查等。对人体来说比 X 射线安全。

静电现象的应用

利用静电现象的机器有静电集尘器、静电喷漆、静电植绒等。其原理和摩擦塑料垫板使之带静电，然后可吸附尘土一样。

静电集尘器的原理及构造如下：

电气式集尘器　给两个电极加上高电压，其间通过含有微粒子的气体（含有灰尘的烟），在负电极（放电电极）周围发生的电晕放电使微粒子带负电。所以微粒子被吸附到正极（集尘电极），随后落到下部被取出（见图 10.72）。

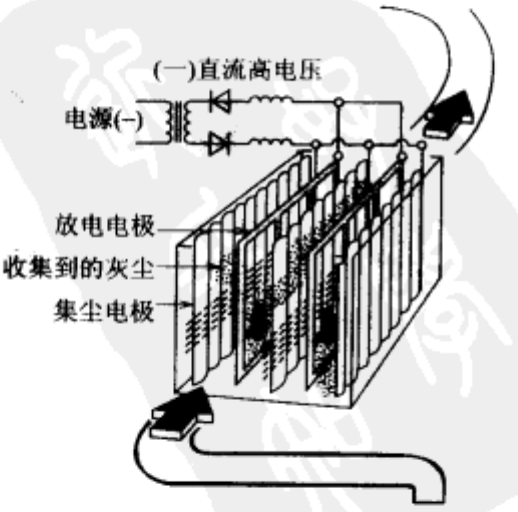


图 10.72　静电集尘器
（九州电力）

相关知识

◆ 超声波引线焊接装置

超声波引线焊接装置是对集成电路等半导体内部进行连线的机器。这个装置用超声波振动能将铝金铜等的导线(从大约头发粗细 1/3 的 25μm 的细线到 500μm 的粗线)摩擦生热而接合,因带有模式识别装置,能自动检测配线的位置并修正,用于生产集成电路(见图 10.73)。

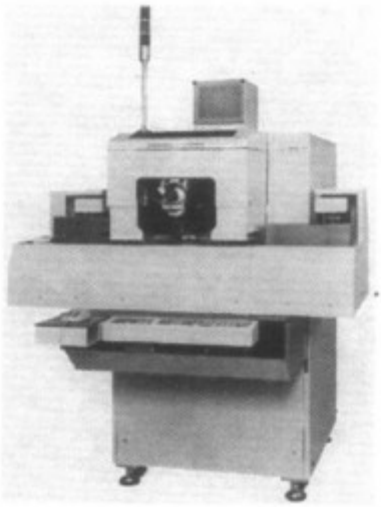


图 10.73 超声波引线焊接装置
(超声波工业)

参考文献

1. 加地正義著：文部省検定済教科書 標準 電気基礎（上），オーム社（1994）
2. 電気学会編：電気工学ポケットブック（第 3 版），オーム社（1973）
3. 小市直人・堀江俊明・豊田達也共著：文部省検定済教科書 標準 情報技術 オーム社（1994）
4. 省力と自動化編集部編：最新メカトロニクス技術百科，オーム社（1988）



跋

本书是1996年出版发行的受到广大读者好评的《电工实用手册》的第二版。这期间的教育环境、技术环境都不断地发生变化，因此，此次改版对第一版的内容进行全面扩充与更新。在改版过程中受到了第一版的启发，并引用了其中的图表，在这里对第一版的执笔者深表感谢。以下列出各位执笔者的名字：

安达　宏司　　阿部　庆士　　饭高　成男　　石井　昌幸
伊东　规之　　大石　清彦　　大塚　　胜　　冈本　裕生
奥吉　新平　　小幡　松二　　仓地　　修　　粉川　昌巳
小林　德藏　　驹井　达生　　昆　　秀行　　坂じゅんいち
坂藤　由雄　　坂原　　登　　坂部　　隆　　定清　一成
佐野　正史　　志贺　道男　　关　　孝明　　田边　　充
富泽　孝幸　　浜田　善治　　原口　勇人　　藤野　拓也
前川　　深　　村田　克彦　　吉村　彰夫　　与那峰　厚
渡边　勉

索 引

数字及英文字母词汇

%电抗压降 …… 344
%电阻压降 …… 344
π形电路 …… 454
Δ形连接电源 …… 128
Δ形连接负载 …… 127
A/D变换 …… 233
AND电路 …… 220
D-FF …… 229
GCS …… 399
IGBT …… 400
JK触发器 …… 228
NAND(与非)电路 …… 222
NOR(或非)电路 …… 222
NOT电路 …… 220
n沟道 …… 179
n型半导体 …… 158
OR电路 …… 220
PD调节 …… 287
PID调节 …… 287
PI调节 …… 287
p沟道 …… 179
p型半导体 …… 160
RS触发器 …… 228
T-FF …… 229
T形电路 …… 454
V形曲线 …… 382
Y-△启动法 …… 364
Y形连接电源 …… 128
Y形连接负载 …… 127

汉字词汇

A

阿拉戈原理 …… 268
爱泼斯坦装置 …… 271
安[培] …… 2

B

百分率同步阻抗 …… 375
半波整流电路 …… 211
半导体开关元件 …… 398
包络线 …… 205
饱和状态 …… 173
保持电流 …… 185
保持电压 …… 185
倍率器 …… 243
比较部分 …… 284
比例调节 …… 285
比例推移 …… 364
比例增益 …… 285
闭环传递函数 …… 294
闭环电路 …… 191
避雷器 …… 514
变换器 …… 402
变流比 …… 341
变频法 …… 365
变容二极管 …… 209
变压比 …… 341
变压电路 …… 211
变压器油 …… 342
标量 …… 47
标准灯 …… 534

标准轨 …… 567
表面功率密度 …… 548
并联 …… 10
并联谐振 …… 105
波顶因数 …… 140
波绕 …… 327
波特线图 …… 293
波形因数 …… 140
伯尔顿水轮机 …… 419
伯努利定理 …… 413
补码 …… 218
不对称波 …… 139
不稳定 …… 294
布朗德尔定理 …… 268
步进角 …… 392
步骤编号 …… 314

C

采样保持电路 …… 233
采样间隔 …… 322
操作量 …… 284
测量距离 …… 582
测量值 …… 240
差动放大器 …… 190
差动输入 …… 320
差动增益 …… 190
差复励 …… 332
长形发光强度计 …… 534
场效应晶体管 …… 166
超导 …… 396
超调量 …… 285
超前 …… 98
超声波 …… 581
超同步谢尔比乌斯方式 …… 387
充电 …… 33
冲击式水轮机 …… 418
初始条件 …… 144
初相角 …… 85
触发同步方式 …… 276
传感器 …… 278
串并联 …… 11
串励发电机 …… 332
串联 …… 10
串联绕组 …… 352,356
串联谐振 …… 104
垂直配光曲线 …… 535
垂直偏转板 …… 274
磁场 …… 60
磁场电阻 …… 338
磁场强度 …… 60
磁畴 …… 395
磁感应强度 …… 61
磁荷 …… 59
磁化 …… 61
磁化率 …… 62
磁化强度 …… 61
磁极 …… 59
磁矩 …… 395
磁力 …… 60
磁力线 …… 60
磁力线密度 …… 61
磁偶极子 …… 59
磁通 …… 61
磁性 …… 61
磁性体 …… 61,395
磁滞 …… 62,396
磁滞电机 …… 391
磁滞回线 …… 271
磁滞损耗 …… 247

D

搭接焊 …… 551
单端输入 …… 320
单极输出 …… 322
单绕组变压器 …… 352
单位正电荷 …… 46

单相半波整流 …… 402
单相感应电压调整器 …… 369
单相全波整流 …… 402
导向轨道 …… 569
德·摩根定理 …… 220
低电压启动法 …… 385
低频感应炉 …… 551
低通滤波器 …… 323
地下引入线 …… 511
第2定律 …… 555
第1定律 …… 555
第二定律(电压定律)…… 18
第一定律(电流定律)…… 18
点焊 …… 551
电池内阻 …… 34
电磁感应 …… 73
电磁继电器 …… 300
电磁力 …… 69
电磁阻尼方式 …… 242
电导率 …… 16
电灯用变压器 …… 516
电动式执行机构 …… 575
电动势 …… 5
电荷 …… 2
电弧加热 …… 542
电介质 …… 395
电介质加热 …… 543
电抗 …… 374
电力二极管 …… 398
电力晶体管 …… 398
电力微型混合集成电路 …… 401
电力系统 …… 446
电力线 …… 42
电力线密度 …… 43
电力线数 …… 43
电量 …… 2
电流 …… 2
电流比 …… 341
电流表 …… 516
电流的热效应 …… 28
电流反馈偏置电路 …… 176
电流放大系数 …… 171
电流互感器 …… 263
电路 …… 5
电气用品安全法 …… 494
电容启动型 …… 367
电枢反应 …… 329
电位 …… 5
电位差 …… 5
电压 …… 5
电压比较电路 …… 197
电压调整率 …… 344
电压互感器 …… 263,354
电压互感器及电流互感器 …… 514
电压增益 …… 190
电子枪 …… 274
电阻材料 …… 394
电阻的温度系数 …… 16
电阻焊 …… 551
电阻加热 …… 542,545
电阻控制 …… 563
电阻率 …… 15
调幅指数 …… 206
调频 …… 208
调频电路 …… 209
调频指数 …… 209
调相 …… 210
调制信号 …… 205
叠加原理 …… 22
叠绕 …… 327
定速电动机 …… 387
动力用变压器 …… 516
动力运行方式 …… 564
渡越 …… 164
端电压 …… 34
短路比 …… 375
短路环型 …… 367
短路曲线 …… 374

断路器 …… 515
对称波 …… 139
对称三相电路 …… 121
对称三相电源 …… 121
对称三相负载 …… 121
对地电容 …… 452
对接焊 …… 551
对流 …… 547
对头焊 …… 551
多数载流子 …… 158,160

E

二次绕组 …… 341
二极管 …… 161,398
二进制数 …… 217

F

发电制动 …… 340,567
发光二极管 …… 188
发射极 …… 166
发射极电流 …… 167
发射极接地电路 …… 171
发射区 …… 166
法兰西斯水轮机 …… 418
反电动势 …… 334
反击式水轮机 …… 418
反接制动 …… 340
反馈电阻 …… 192
反馈信号 …… 284
反射率 …… 530
反推启动型 …… 367
反相放大 …… 173
反相放大电路 …… 192
反相输入端 …… 193
反向关断三端晶闸管 …… 185
反型层 …… 182
反转 …… 340
放电 …… 33
飞轮 …… 387
分接头控制 …… 564
分流 …… 12
分路绕组 …… 352,356
分配律 …… 220
分区开关 …… 513
分相启动型 …… 367
缝(液)焊 …… 551
弗莱明左手定则 …… 69
伏打电池 …… 32
伏[特] …… 5
负反馈电路 …… 191
负逻辑 …… 223
负特性 …… 553
负载电阻 …… 171
负载容量 …… 352
负载损耗 …… 344
负载线 …… 171
复合组件 …… 401
复励发电机 …… 332
复平面 …… 92
复数 …… 92
复数的四则运算 …… 93
副边电阻法 …… 364,365
副边感应电动势 …… 359
副边励磁法 …… 365
副边频率 …… 359

G

杆上变压器 …… 342
感应加热 …… 543
感应式电度表 …… 268
高磁导率铁淦氧 …… 396
高频感应炉 …… 551
高频加热 …… 543
高斯定理 …… 42
高斯计 …… 270

高温超导材料 …… 396
高压电动机 …… 516
高压电缆 …… 512
高压绝缘电线 …… 512
高压提相电容器 …… 516
隔离开关 …… 514
工作点 …… 172
功率因数 …… 111
供电设备 …… 468
共价键 …… 157
共模抑制比 …… 191
固定偏置电路 …… 175
固有容量 …… 352
贯流式锅炉 …… 423
光传感器 …… 574
光电变换元件 …… 574
光电导器件 …… 187
光电导效应 …… 187
光电二极管 …… 188
光速 …… 39
国际标准软钢 …… 394
过电流继电器 …… 516
过电压 …… 477

H

焊接塑料 …… 582
耗尽层 …… 162
合成波 …… 139
亨[利] …… 77
横轴反应 …… 382
红外线传感器 …… 574
红外线灯泡 …… 544
红外线加热 …… 544
互补律 …… 220
互感器开关 …… 516
滑行方式 …… 565
还原律 …… 220
环形计数器 …… 231
惠斯通电桥 …… 256
霍尔电动势 …… 71
霍尔效应 …… 71

J

击穿 …… 163
击穿电压 …… 163
积除以和 …… 10
积分常数 …… 143
积分电路 …… 149
积分调节 …… 287
积复励 …… 332
基本指令 …… 313
基波 …… 139
基极 …… 166
基极电流 …… 167
基极接地电路 …… 173
基区 …… 166
畸变因数 …… 140
激光器 …… 189
级联 …… 463
极化作用 …… 32
极数切换法 …… 365
集电极 …… 166
集电极电流 …… 167
集电极调制电路 …… 206
集电极接地电路 …… 174
集电区 …… 166
寄生晶闸管 …… 400
加法运算电路 …… 195
加极性 …… 347
价电子 …… 157
架空引入线 …… 511
间接测量 …… 240
间接电弧加热 …… 542
间接电阻加热 …… 542
间接式电弧炉 …… 550
间接式电阻炉 …… 549

检波电路 …… 206
检测部分 …… 284
减法运算电路 …… 196
减极性 …… 347
降压斩波器 …… 404
交叉 …… 453
交换律 …… 220
交流磁化电流 …… 271
交流电车 …… 562
交流电动势 …… 81
交流功率 …… 111
交流式 …… 389
交流伺服电机 …… 391
交流斩波器 …… 404
交直流电车 …… 562
焦耳定律 …… 28
焦耳热 …… 28
角度调制 …… 210
角频率 …… 84
阶跃响应 …… 292
结合律 …… 220
截止状态 …… 172
解调 …… 209
介质极化 …… 395
金属弧焊 …… 552
晶闸管 …… 398
晶闸管启动法 …… 386
晶闸管相位控制 …… 564
静电力 …… 42,262
静止发电机-电动机组方式 …… 339
距离平方反比定律 …… 533
绝缘电线 …… 494
绝缘体 …… 395
绝缘油 …… 395
均匀磁场 …… 80

K

卡普兰水轮机 …… 418
开尔文双电桥 …… 257
开关电源电路 …… 214
开关控制 …… 214
开环传递函数 …… 294
坎[德拉]每平方米 …… 531
抗磁性物质 …… 61
可变电容器 …… 209
可见光 …… 528
克莱玛方式 …… 365
空气阻尼方式 …… 242
空载饱和曲线 …… 374
空载损耗 …… 344
控制部分 …… 284
控制对象 …… 284
控制量 …… 284
控制偏差 …… 284
控制器 …… 297
控制装置 …… 242
库[仑] …… 2
扩散 …… 161

L

拉出同步 …… 381
拉出转矩 …… 381
兰金循环 …… 422
楞次定律 …… 74
冷却媒体 …… 395
利用率 …… 351
联锁电路 …… 307
列车集中控制装置 …… 564
列车自动运行装置 …… 570
临界磁场 …… 396
临界电流密度 …… 396
临界温度 …… 396
零相电流互感器 …… 513
流[明]每平方米 …… 530
笼型感应电动机 …… 358
漏磁通 …… 355,374

漏极接地 …… 183
漏抗 …… 374
滤波电路 …… 211
滤波电容器 …… 212
洛伦兹力 …… 71

M

麦克斯韦电桥 …… 107
麦斯纳效应 …… 396
脉冲电机 …… 392
脉动电压 …… 212
脉宽调制 …… 403
满载效率 …… 345
门槛电压 …… 182

N

奈奎斯特图 …… 294
内并励 …… 332
内铁型 …… 341
能带隙 …… 155
逆变控制 …… 564

O

欧姆定律 …… 8
欧姆结 …… 163
欧[姆]米 …… 15

P

帕邢定律 …… 395
配电线路 …… 446
配光 …… 535
配光曲线 …… 535
偏差信号 …… 285
频率 …… 84
频率特性 …… 190
频率响应 …… 293
平复励 …… 333
平均值 …… 86
坡莫合金 …… 396
珀尔帖效应 …… 29

Q

齐纳二极管 …… 164
齐纳击穿 …… 163
气动式执行机构 …… 575
启动补偿器 …… 385
启动补偿器法 …… 364
启动电动机法 …… 385
启动电阻 …… 338
启动绕组 …… 380
器件编号 …… 314
千瓦·时 …… 26
迁移率 …… 158
钳形探头 …… 263
强磁性体 …… 61,396
清洗 …… 582
全波整流电路 …… 211
全电压启动法 …… 364
全扩散面 …… 530
群容量 …… 351

R

绕线型感应电动机 …… 358
热传导 …… 546
热电变换元件 …… 573
热电动势 …… 28
热电势 …… 394
热计算图 …… 425
热容量 …… 545
热循环 …… 422
软钢 …… 394
弱磁性体 …… 61

S

塞贝克效应 …… 28
三端电压调整器 …… 213
三端双向晶闸管 …… 185
三相感应电压调整器 …… 370
三相交流电动势 …… 114
三相全波整流 …… 402
闪光焊 …… 551
少数载流子 …… 158,160
升压斩波器 …… 404
失步 …… 378
施拉盖电动机 …… 389
施主 …… 159
十进制计数器 …… 230
十进制数 …… 217
十六进制计数器 …… 229
十六进制数 …… 217
石墨化炉 …… 549
时间常数 …… 145
时序图 …… 302
时钟脉冲 …… 231
示波器 …… 271
视在功率 …… 111
受激发射 …… 188
受主 …… 160
枢轴型电磁继电器 …… 301
输出阻抗 …… 190
输电线路 …… 446
输、配电系统 …… 446
输入电压 …… 190
输入阻抗 …… 190
束缚电荷 …… 477
数控机床 …… 577
数字滤波 …… 323
数字式多量程测量仪表 …… 254
数字式钳形电流表 …… 263
数字式万用表 …… 254
衰减率 …… 297
双极晶体管 …… 166
双极输出 …… 322
双绕组变压器 …… 354
双向三端晶闸管 …… 399
水的能量 …… 412
水平配光曲线 …… 535
水平偏转板 …… 274
顺磁性物质 …… 61
瞬时值 …… 86
斯蒂芬·玻尔兹曼常数 …… 547
伺服电机 …… 391
伺服机构 …… 391
速报 …… 487
速度调整器 …… 338
速度整定率 …… 378
隧道二极管 …… 165
隧道效应 …… 164
损耗落差 …… 413

T

太阳电池 …… 187
碳弧焊 …… 552
特定电气用品 …… 489
特定电气用品以外的电气用品 …… 489
特[斯拉] …… 61
梯形图 …… 312
铁磁性体 …… 396
铁淦氧 …… 396
铁损 …… 345,396
铁氧磁性体 …… 396
通用电动机 …… 389
同步电抗 …… 374
同步计数器 …… 231
同步瓦特 …… 362
同步转速 …… 357,359
同步阻抗 …… 374,375
同位素 …… 427

同相 …… 85
同相放大电路 …… 193
同相输入端 …… 193
同相增益 …… 191
铜损 …… 345
透过率 …… 531
凸焊 …… 551

W

瓦[特]·秒 …… 26
外井励 …… 332
外界干扰 …… 284
外铁型 …… 341
微波加热 …… 543
微处理器 …… 574
微分电路 …… 149
微分调节 …… 285
微分增益 …… 285
温度传感器 …… 573
温度辐射 …… 524
稳定 …… 294
稳定度 …… 378
稳定偏差 …… 287
稳态电流 …… 143
稳压电路 …… 211
涡流损耗 …… 396
无功功率 …… 111
无功功率因数 …… 133
无功环流 …… 377
无刷电机 …… 390
无限远处 …… 47
无整流子电动机 …… 386,387,389
误差 …… 240

X

西[门子]每米 …… 16
吸收律 …… 220
吸收率 …… 531
下垂特性 …… 553
线电阻 …… 17
线间电容 …… 452
线路容量 …… 352
线性电机 …… 392
线性感应电机 …… 392,570
线性脉冲电机 …… 392
线性同步电机 …… 392,570
线性直流电机 …… 392
详报 …… 487
相对磁导率 …… 62
相对介电常数 …… 38
相对转速 …… 359
相量 …… 90
相量图 …… 96
相位 …… 85
相位差 …… 84
相位控制 …… 398,402
相位特性曲线 …… 382
相位裕量 …… 295
相序 …… 113
相转移 …… 396
橡胶执行机构 …… 575
肖特基二极管 …… 163
谐波 …… 139
谐振频率 …… 104
谢尔比乌斯方式 …… 365
形态系数 …… 547
虚短路 …… 191
旋转编码器 …… 297
旋转磁场 …… 357
旋转方向 …… 358
选择性 …… 105
雪崩击穿 …… 164
循环变频器 …… 403

Y

压降 …… 11

压力传感器 …… 574
压敏元件 …… 574
盐浴炉 …… 549
摇动式电弧炉 …… 550
一次绕组 …… 341
移位寄存器 …… 231
已调波 …… 205
异步计数器 …… 231
逸出功 …… 163
荧光屏 …… 274
硬铜 …… 394
永磁铁淦氧 …… 396
永磁转子 …… 380
永久磁铁 …… 59
用电设备 …… 468
油压式执行机构 …… 575
有功功率 …… 111
有效值 …… 87
源极接地 …… 183
远程控制 …… 324
远红外加热器 …… 544
允许误差 …… 252

Z

匝数比 …… 341
杂散损耗 …… 345
载波 …… 205
载流子 …… 158
载流子浓度 …… 158
再处理 …… 432
再热循环 …… 423
再热再生循环 …… 423
再生循环 …… 422
再生制动 …… 340,567
暂态电流 …… 143
增益裕量 …… 295
栅极接地 …… 183
窄轨 …… 567
斩波控制 …… 563
照明率 …… 539
诊断装置 …… 582
真空的磁导率 …… 62
振荡 …… 378
整流电路 …… 211
正电荷 …… 2
正逻辑 …… 223
正弦交流电流 …… 80
正向电流 …… 162
正向电压 …… 162
执行机构 …… 297,575
直动式记录仪 …… 274
直接测量 …… 240
直接电弧加热 …… 542
直接电阻加热 …… 542
直接式电弧炉 …… 550
直接式电阻炉 …… 549
直接同步方式 …… 275
直流电车 …… 562
直流式 …… 389
直流伺服电机 …… 391
直流斩波器 …… 404
指令用语 …… 314
制动 …… 340
制动方式 …… 565
制动绕组 …… 380,387
质子 …… 157
滞后 …… 97
中点 …… 121
中线 …… 121
重叠律 …… 220
周期 …… 84
周期函数 …… 139
转差率 …… 359
转矩 …… 334,358
转速 …… 359
转折电压 …… 185
状态 …… 171

自保持电路 …… 306
自动平衡记录仪 …… 274
自给偏置电路 …… 176
自然发射 …… 188
自身容量 …… 352
自由电子 …… 2
纵轴反应 …… 382
总落差 …… 413
阻抗 …… 97
阻抗角 …… 100
阻尼装置 …… 242
最大能见度。 …… 528
最大频率偏移 …… 209
最大值 …… 81
最佳控制调节 …… 287
作用电感 …… 452
作用电容 …… 452